

와류이탈 위상차를 이용한 사보니우스형 풍력터빈의 소음 저감 설계에 관한 수치적 연구

김 상 현* · 정 철 응*†

* 부산대학교 기계공학부

Numerical Analysis on the Low Noise Designs of Savonius Wind Turbines by Inducing Phase Difference in Vortex Shedding

Sanghyeon Kim* and Cheolung Cheong*†

* School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.

(Received August 1, 2013 ; Revised December 16, 2013 ; Accepted December 17, 2013)

Key Words: Low Noise Design(저소음 설계), Flow Noise(유동소음), Vertical-Axis Wind Turbine(수직축 풍력터빈), Vortex(와류), Savonius(사보니우스)

초록: 본 논문에서는 사보니우스형 풍력터빈의 저소음 설계에 관한 연구를 수행하였다. 선행연구를 통해 BPF 보다 높은 주파수를 기본주파수로 가지며 발생하는 하모닉 성분의 순음소음이 사보니우스형 풍력터빈의 주요한 소음원을 밝혔고, 이러한 하모닉 성분의 소음은 와류에 의한 것임을 확인하였다. 본 연구에서는 이러한 선행연구결과를 바탕으로, 사보니우스형 풍력터빈의 저소음 설계를 위해 이탈되는 와류에 위상차를 유도할 수 있는 터빈 날개 끝단을 도입하였다. CFD 기법 및 음향상사법을 적용한 복합 전산공력음향학 기법을 적용하여 제안한 저소음 사보니우스형 풍력터빈의 방사 소음을 수치적으로 예측하였고, 기존의 형상과 비교를 통해 소음 저감 효과를 확인하였다.

Abstract: In this study, low noise designs for a Savonius wind turbine were numerically investigated. As was reported in our previous study, the harmonic components with a fundamental frequency higher than the BPF were identified as being dominant in the noise spectrum of a Savonius wind turbine, and these components were a result of vortex shedding. On a basis of this observation, an S-shaped blade tip is proposed as a means of reducing the noise generated by small vertical(Savonius) wind turbines. This blade induces phase differences in the shedding vortices from the blades, and thus reduces the noise from the wind turbine. The aerodynamic noise characteristics of the conventional and "S-shaped" Savonius turbines were investigated by using the Hybrid CAA method where the flow field around the turbine is computed using the CFD techniques and the radiated noise are predicted by applying acoustic analogy to the computed flow field data. The degree of noise reduction resulting from the proposed design and its reduction mechanism were confirmed by comparing the predicted noise spectrum of these turbines and the flow characteristics around them.

1. 서 론

수직축 풍력발전기는 바람의 방향에 무관한 발전성, 간단한 구조로 인한 유지·보수의 용이함, 간편한 제작, 저렴한 비용 등 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 낮은 발전효율로 인해 대형 풍력터빈에서는 주로 사용

되지 못하고, 도심지나 주거지역 인근에서 주로 독립형 소형 풍력터빈으로 이용되고 있다. 그 중에서도 사보니우스형 풍력터빈은 매우 낮은 풍속에서부터 발전이 가능해 독립형 풍력터빈에서 가장 널리 사용되고 있는 수직축 풍력터빈의 한 종류이다. 독립형 풍력터빈은 사용되는 장소의 특성상, 인접한 주민들이 터빈에서 발생하는 소음에 장시간 지속적으로 노출되기 때문에 동일한 레벨의 음압을 발생시키는 다른 기계들에 비해 소음에 대한 민원의 빈도가 높고, 그 피해 또한 적지 않다. 그러므로, 독립형 풍력터빈으로서 사보니

† Corresponding Author, ccheong@pusan.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

우스형 풍력터빈의 광범위한 보급을 위해서는 성능의 향상뿐만 아니라 주요 소음원의 발생원인을 이해하고, 이를 바탕으로 한 저소음 설계가 필수적이다.

본 연구에서는 선행연구^(1,2)를 통하여 확인한 사보니우스형 풍력터빈의 소음 특성을 이용하여, 저소음 사보니우스형 풍력터빈의 설계를 위한 연구를 수행하였다. 선행연구에서 사보니우스형 풍력터빈에서는 날개깃 통과 주파수(Blade Passing Frequency, BPF)보다 높은 주파수에서 기본주파수로 가지는 하모닉 순음성분이 주요한 소음원으로 작용하고 있고, 해당 소음 성분은 날개 끝단에서 이탈하는 와류에 의해 발생한다는 것을 보고하였다. 본 논문에서는 이러한 결과를 이용하여 이탈하는 와류에 위상차를 유도하여 소음을 저감할 수 있는 S-자 형태의 터빈 날개 끝단을 도입하였다. 복합 전산공력음향학(Hybrid Computational Aero-acoustics) 기법을 적용한 수치해석을 통해 제안한 저소음 사보니우스형 풍력터빈의 방사 소음을 수치적으로 예측하고, 기존의 형상과 비교를 통해 소음 저감 효과를 확인하고 유동장 특성의 비교를 통하여 소음저감 메커니즘을 제시한다.

2. 사보니우스형 풍력터빈

사보니우스형 풍력터빈은 Savonius⁽³⁾에 의해 고안된 대표적인 항력형 수직축 풍력터빈의 한 형태이다. 사보니우스형 풍력터빈은 반원 형태의 날개, 중심축, 끝판으로 이루어져 있다(Fig. 1). 본 연구에 사용한 사보니우스형 풍력터빈은 날개직경 $d=0.55\text{m}$, 끝판직경 $D=0.57\text{m}$, 높이 $h=0.72\text{m}$, 회전속도 $\omega=16.364\text{rad/s}$, 입사풍속 $U=9.0\text{m/s}$ 로 설정하였다. 겹침비($e/2r$)와 띄움비($a/2r$)는 선행연구와 조건을 동일하게 유지하여 위하여 모두 0으로 설정하였다.

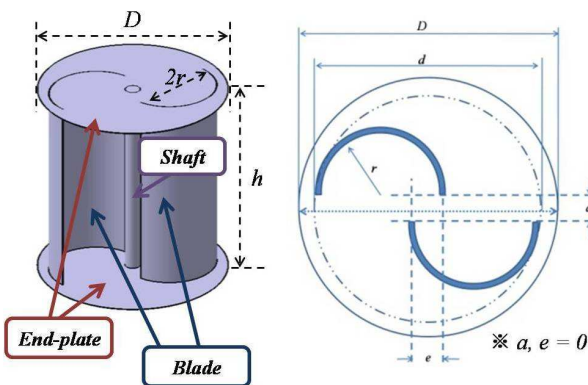


Fig. 1 Configuration and cross-sectional view of a Savonius wind turbine

3. 수치해석방법

사보니우스형 풍력터빈의 유동소음을 해석하기 위해, 복합 전산공력음향학을 이용한 수치해석기법을 적용하였다. 먼저 소음원이 되는 유동장을 전산유체역학 방법을 적용하여 해석한 다음, 예측한 유동장의 정보를 바탕으로 음향상사법을 적용하여 방사소음을 예측하였다. 다음에서 각각의 방법에 대하여 기술한다.

3.1 해석격자

소음원에 대한 유동해석 정보를 취득하기 위해 비정상 비압축성 3차원 유동장 해석을 수행하였다. Fig. 2는 계산에 사용한 해석격자를 나타내고 있다. 전체 해석 영역은 풍력터빈을 포함하는 회전 영역과 풍력터빈 주변의 정지하고 있는 영역으로 나누어 설정하였다. 특히, 풍력터빈 날개 주변은 더욱 조밀한 격자를 생성하여 벽면 근처에서의 복잡한 유동 현상을 보다 정확하게 예측할 수 있도록 하였다.

3.2 전산유체역학을 이용한 유동장 해석

사보니우스형 풍력터빈의 유동소음을 예측하기 위해서는 소음원이 되는 풍력터빈 주변의 3차원 유동장에 대한 정보가 필요하다. 이를 위해 다음 방정식으로 표현되는 비정상 비압축성 3차원 Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식을 사용하였다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial}{\partial t}(u_i) + \rho u_j \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i) \\ = \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 항은 유동장 내의 난류에 의한 영향을 나타내기 위해 추가된 Reynolds stress를 나타낸다. 전산유체역학에서는 난류 모델을 적용하여 이러한 난류에 의한 영향을 수치적으로 계산하게 된다. 본 연구에서는 벽면 근처에서의 복잡한 난류현상을 비교적 정확히 모사하는 난류모델로 알려져 있는 $k-\omega$ SST난류 모델을 사용하였다. 또한 유한체적법을 사용하여 3차원 유동장을 이산화하였고, UPWIND 방법과 SIMPLE 방법을 적용하여 수치 연산을 수행하였다. 회전 영역과 정지 영역 사이의 수치적 정보전달을 위해 Sliding mesh기법을 사용하였으며, 경계조건으로 Velocity inlet과 Pressure outlet을 설정하였다.⁽⁴⁾ 유동장 해석은 풍력터빈 회전주기에 맞는 일정한 물리적 현상이 반복적으로 발생할 때까지 수행하였다.

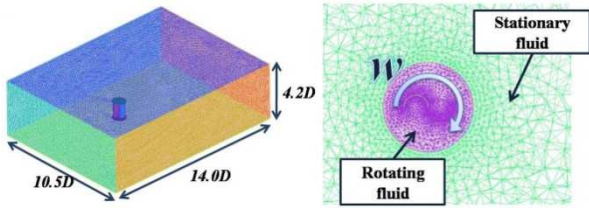


Fig. 2 Computational domain

3.3 음향상사법을 이용한 유동소음 해석

유동소음원은 Lighthill^(6,6)이 음향상사법을 통하여 처음으로 수학적으로 정의하였다. Lighthill은 유동장내 난류에 의해 발생하는 공기역학적 소음을 사극자 소음원으로 나타낼 수 있음을 보였다. Curle⁽⁷⁾은 이를 확장하여 정지하고 있는 물체가 포함된 유동장 내에서 발생하는 소음을 물체 표면에서의 힘의 변동에 의한 이극자 소음원으로 나타내었다. Ffowcs Williams와 Hawkings⁽⁸⁾는 이를 움직이는 물체가 포함된 유동장으로 확장하여, 유동장 내에서 발생하는 소음을 단극자, 이극자, 사극자 소음원의 합으로 표현하였다. 식 (3)은 Ffowcs Williams와 Hawkings에 의해 제안된 비체차 파동 방정식을 나타내고 있다.

$$\frac{1}{a_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho(u_n - v_n)] \delta(f) \} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho(u_n - v_n)] \delta(f) \} + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{ T_{ij} H(f) \} \quad (3)$$

여기에서 T_{ij} 는 $T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij}$ 로 나타나는 Lighthill의 응력텐서이다. 식 (3)의 오른쪽 항은 순서대로 부피의 시간 변화율에 의한 단극자 소음원, 물체 표면에서의 힘의 변동에 의한 이극자 소음원, 유동장 내 난류에 의한 사극자 소음원을 의미한다. 본 연구에서는 사보니우스형 풍력터빈을 완전히 둘러싸는 폐곡면을 소음원 영역으로 설정하여 해당 영역에서 시간에 따른 소음원 정보를 취득하였다. 이를 식 (3)과 같은 FW-H 방정식을 사용하여 사보니우스형 풍력터빈의 유동소음을 해석하였다.

4. 수치해석 결과

4.1 사보니우스형 풍력터빈 소음특성

유동장 예측결과의 유효성은 격자 미세화 연구 및 Blackwell⁽⁹⁾ 등이 제시한 풍동 실험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 이를 위해 식 (4)와 같은 파워 계수를

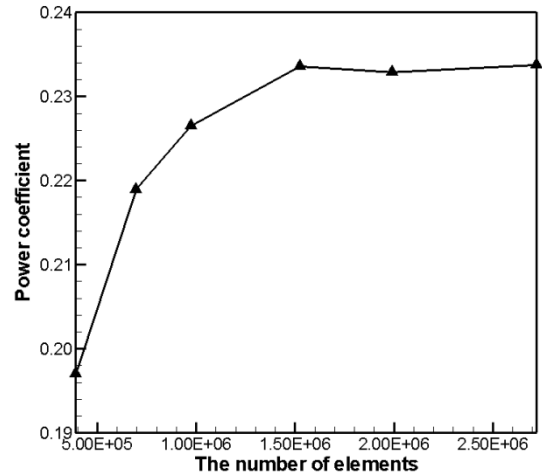


Fig. 3 Result of a grid refinement study

사용하였다. 여기에서 T 는 토크, w 는 회전속도, U 는 입사풍속, A 는 단면적을 의미한다. 일반적으로 풍력터빈의 성능은 파워 계수값의 한 바퀴 평균값인 평균 파워 계수를 사용하여 비교한다.

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (4)$$

Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 격자 미세화 연구를 통해 약 150 만개 이상의 격자에서 예측한 평균 파워 계수가 약 0.233 으로 수렴된 결과를 보임을 확인할 수 있다. 또한, 이는 Blackwell 등이 제시한 실험 결과치와 8% ~ 10% 이내의 범위에서 일치하였다.

4.2 사보니우스형 풍력터빈 소음특성

사보니우스형 풍력터빈의 소음특성은 선행 연구^(1,2)를 통해 BPF 소음과 기본 주파수가 BPF 보다 큰 하모닉 성분(이하 고조파 소음)으로 이루어진다는 것을 확인하였다. BPF 소음은 날개의 수와 터빈의 회전속도에 의해 정해지는 날개 통과 주파수에서 발생하는 회전체 특유의 소음특성이다.⁽¹⁰⁾

Fig. 4는 풍력터빈 후류방향 10m 위치에서 예측한 사보니우스형 풍력터빈의 소음 스펙트럼을 나타내고 있다. 기본주파수 162 Hz 를 가지고 발생하는 고조파 소음이 5.2 Hz 의 BPF 성분과 더불어 스펙트럼 전체에서 주요한 성분으로 작용하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 고조파 소음의 경우 입사되는 바람과 회전하는 사보니우스형 풍력터빈 날개의 상호작용에 의해 날개 내부에서 발생하는 와류에 의해 발생하고 있다.^(1,2) 다음절에서 이러한 메커니즘으로 발생하는 고조파 소음을 저감하기 위한 방법을 제시하고 그 유효성을 확인하고자 한다.

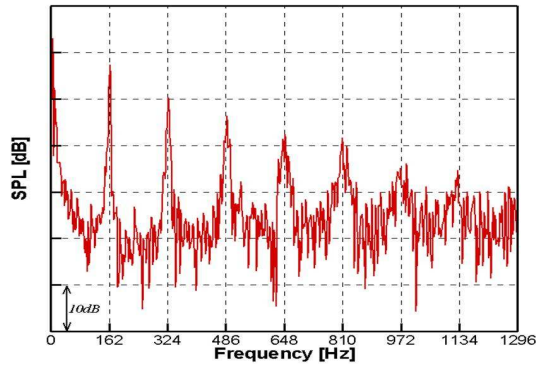


Fig. 4 Predicted sound pressure spectrum of a Savonius wind turbine

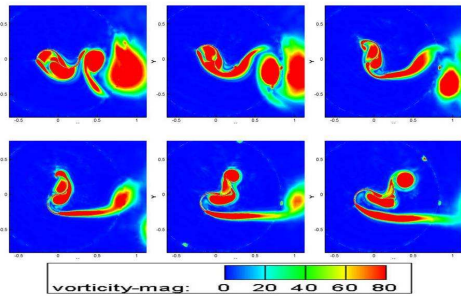


Fig. 5 Snapshot of vorticity distribution during one rotating of a Savonius wind turbine

4.3 저소음 사보니우스형 풍력터빈 설계

선행연구^(1,2)를 통해 고조파 소음의 원인은 Fig. 5에서와 같은 사보니우스형 풍력터빈 날개 내부에서 발생하여 후류방향으로 이탈되는 와류에 의한 것임을 밝혔다. 본 연구에서는 이러한 와류에 의해 발생하는 고조파 소음을 저감시키기 위해 풍력터빈의 날개 끝단 형상을 변화시켜 이탈되는 와류에 위상차를 유도하였다. Fig. 6은 기존 사보니우스형 풍력터빈의 날개 형상과 제안한 저소음 사보니우스형 풍력터빈 날개 형상을 비교하여 나타내고 있다.

제안한 저소음 사보니우스형 풍력터빈 날개 형상은 스팬방향으로 날개를 직선적으로 밀어내던 기존의 형상과는 다르게, 날개 단면형상은 유지하면서 날개 끝단 형상이 S자 형상을 가지도록 날개 끝단을 중심축을 기준으로 비틀어주게 된다. 이때, 스팬방향으로 전체 높이의 1/4이 되는 위치와 3/4이 되는 위치에서 최대 비틀림 각도를 가지되 그 방향이 반대가 되도록하고, 높이 방향 2/4 위치와 양 끝은 기존의 형상과 동일하게 만들어 최종적으로는 날개 끝단 형상이 sine 함수의 형상을 가지도록 하였다.

날개 끝단 형상 변화를 통한 소음저감은 많은 연구를 통해 여러 분야에서 적용되어 왔다.^(11,12) 이러한 대부분의 연구는 형상 변화를 통해 날개 끝단과 난류의

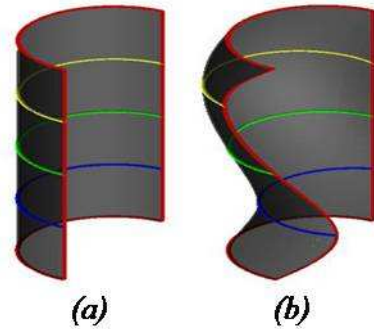


Fig. 6 Configuration of Savonius turbine blades; (a) the original model, and (b) a low noise design model

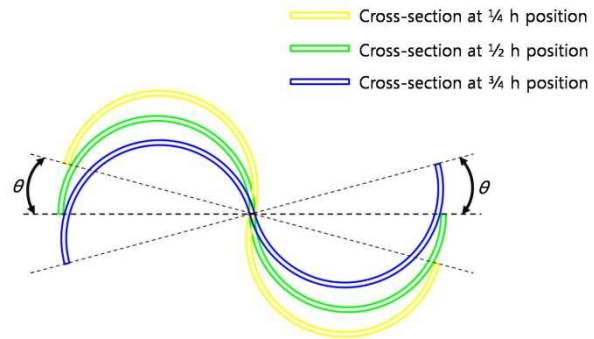


Fig. 7 Overlapped cross-sectional view of low noise Savonius wind turbine blade

상호작용에 의하여 발생하는 광대역 소음 저감에 그 목적을 두고 있다. 반면 본 연구에서는 날개 끝단 형상 변화를 통해 날개 내부에서 발생하는 와류의 구조를 변형시켜 와류에 의한 Tonal 성분의 소음을 저감을 위해 Fig. 6과 같은 형상을 제안하였다.

Fig. 7은 본 연구에서 제안한 저소음 사보니우스형 풍력터빈의 날개에 대해, 스팬방향으로 전체 높이의 1/4, 2/4, 3/4이 되는 위치에서의 날개 단면형상을 겹쳐 나타내고 있다. 이 때, 단면 형상은 동일한 중심축에 고정된 채로 날개 끝단에서 만큼 비틀림 각을 가지게 되고 이 각을 θ 라고 정의하고 S자 형태의 날개의 구조를 정량적으로 결정하는 설계인자로 사용한다.

Fig. 8은 비틀림 각도를 각각 $\theta=5^\circ$, $\theta=10^\circ$, $\theta=20^\circ$ 로 설정한 저소음 사보니우스형 풍력터빈에 대해 기존 사보니우스형 풍력터빈과의 스펙트럼 비교를, Fig. 9는 기존 형상과 $\theta=20^\circ$ 일 때의 와도에 대한 ISO contour를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 저소음 사보니우스형 풍력터빈에서는 날개 끝단에서 발생하는 와류의 구조가 크게 변형되어 고조파 소음의 음압레벨 크기가 현저히 저감되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 고조파 소음의 소음저감 효과의 원인은 다음의 Fig. 10과 Fig. 11을 통해 분석할 수 있다.

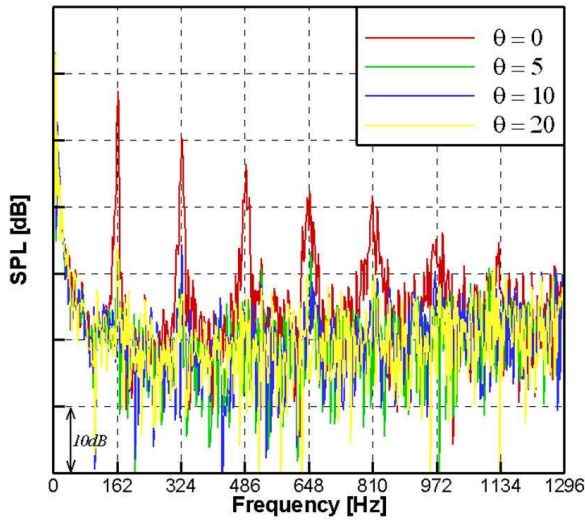


Fig. 8 Comparison of predicted noise spectrum from the conventional Savonius wind turbine and the proposed low noise design of turbine

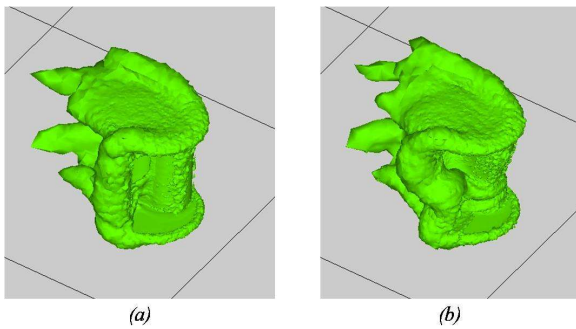


Fig. 9 Comparison of ISO contour of Vorticity for; (a) original model and (b) modified models of $\theta=20^\circ$

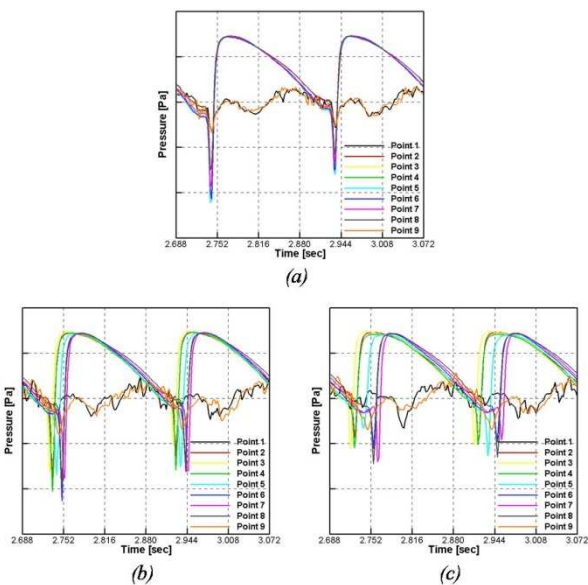


Fig. 10 Time histories of pressure at the monitoring points located parallel to the rotation axis of the turbine for; (a) the original model and modified models of (b) $\theta=10^\circ$ and (c) $\theta=20^\circ$

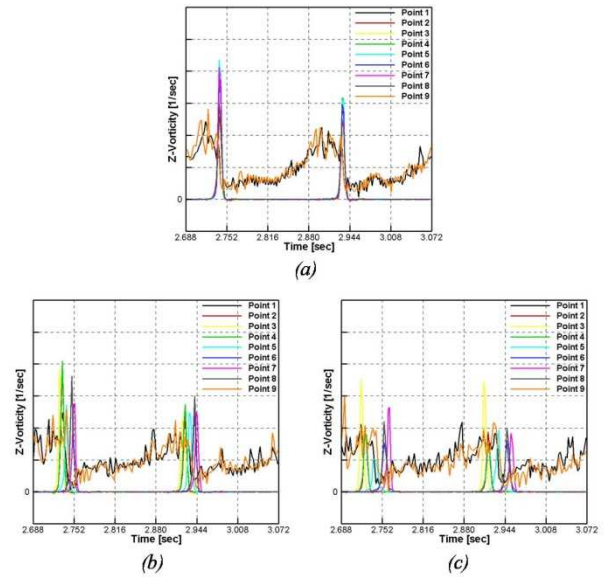


Fig. 11 Variation of vorticity in z-direction at the monitoring points located parallel to the rotation axis of the turbine for (a) the original model, and the modified models of (b) $\theta=10^\circ$, and (c) $\theta=20^\circ$

Fig. 10 과 Fig. 11 은 날개 끝전 비틀림을 통한 저소음 사보니우스형 풍력터빈 날개에 의해 유도되는 와류이탈 위상차를 정량적으로 분석하기 위해 날개끝에서 이탈하는 와류가 통과하는 지점에 회전축과 평행한 직선상에 등 간격으로 위치한 9 개의 점들에서 시간에 따른 압력과 와도의 z-좌표 성분을 비교하였다. Fig. 10(a)를 보면, 기존의 사보니우스형 풍력터빈에서는 해당 위치에서의 압력변동이 동일한 위상을 가지고 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 Fig. 10(b-c)에서와 같이 비틀림 각을 적용한 저소음 사보니우스형 풍력터빈에서는 비틀림 각에 의해 위치에 따른 압력신호 사이에 위상차가 발생하였고 또한 변동되는 압력의 크기도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11 에서 나타낸 와도의 z-방향 성분도 압력과 마찬가지로 비틀림 각에 의해 위상차가 발생하고 변동되는 크기가 저감됨을 확인할 수 있다. 결과적으로 날개 끝전 비틀림을 통해 압력 및 와도 변동의 크기가 감소되었고, 이로 인해 사보니우스형 풍력터빈에서 발생하는 고조파 소음이 줄어드는 것을 알 수 있다.

제한한 저소음 사보니우스형 풍력터빈의 유용성과 날개 끝전 형상 변화의 효과를 정량적으로 분석하기 위해 비틀림 각도에 따른 평균 파워 계수 및 소음레벨을 비교해보았다. 비틀림 각도에 따른 평균 파워 계수는 각각 $C_{p,\theta=0^\circ} = 0.233$, $C_{p,\theta=5^\circ} = 0.231$, $C_{p,\theta=10^\circ} = 0.231$, $C_{p,\theta=20^\circ} = 0.236$ 으로 나타나, 날개 끝전을 변형시키더라도 동일한 성능을 가진 것을 확인할 수 있다.

또한 비틀림 각도에 따른 소음레벨은 $OSPL_{\theta=0^\circ} = 56.0\text{dB}$, $OSPL_{\theta=5^\circ} = 54.1\text{dB}$, $OSPL_{\theta=10^\circ} = 53.9\text{dB}$, $OSPL_{\theta=20^\circ} = 53.3\text{dB}$ 로 나타나 비틀림 각도가 $\theta=20^\circ$ 인 경우에서 약 2.7dB의 가장 큰 소음저감효과를 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 수직축 풍력터빈의 한 형태인 사보니우스형 풍력터빈의 소음 저감 설계에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 사보니우스형 풍력터빈의 주요한 소음 성분인 고조파 소음은 풍력터빈 내부에서 발생하는 와류에 의하여 발생한다는 선행연구결과를 바탕으로 이를 저감시키기 위해 날개 끝전 형상을 S자 형태로 변화시킨 저소음 설계안을 제안하였다. 이러한 S자 형태의 날개가 날개 끝전을 통해 이탈되는 와류에 위상차를 유도하였고, 유동장 내 압력변동의 크기를 서로 상쇄시킴으로써 사보니우스형 풍력터빈에서 발생하는 고조파 소음을 저감할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 또한, 본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20113020020010)입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, S., 2013, "Investigation on the Flow Noise Characteristics of Savonius-Type Vertical-Axis Wind Turbines," *Master Thesis*, Pusan National University.
- (2) Kim, S. and Cheong, C., 2013, "Numerical Analysis on the Flow Noise Characteristics of Savonius wind Turbines," *Transaction of the KSNVE*, Vol. 23, No. 6. pp. 496~501.
- (3) Savonius, S. J., 1931, "The S-Rotor and its Applications," *Mech. Eng.*, Vol. 53, pp. 333~338.
- (4) Fluent 12.0 Theory guide, ANSYS (2009).
- (5) Lighthill, M. J., 1952, "On Sound Generated Aerodynamically. I. General theory," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 211, pp. 564~587.
- (6) Lighthill, M. J., 1954, "On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound," *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 222, pp. 1~32.
- (7) Curle, N., 1955, "The Influence of Solid Boundaries Upon Aerodynamic Sound," *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 231, pp. 505~514.
- (8) Ffowcs Williams, J. E. and Hawkings, D. L., 1969, "Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion," *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 264, pp. 321~342.
- (9) Blackwell, B. F., Sheldahl, R. E., Feltz, L. V., 1977, "Wind Tunnel Performance Data for Two-and Three-Bucket Savonius Rotors," *Journal of Energy*, Vol. 2, pp. 160~164.
- (10) Heo, S., Kim, D., Cheong, C. and Kim, T.-H., 2011, "Prediction of Internal Broadband Noise of a Centrifugal Fan Using Stochastic Turbulent Synthetic Model," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 21, No.12, pp. 1138~1145.
- (11) Howe, M. S., 1991, "Aerodynamic Noise of a Serrated Trailing Edge," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 5, pp.33~45.
- (12) Moreau, D. J., Brooks, L. A. and Doolan, C. J., 2012, "On the Noise Reduction Mechanism of a Flat Plate Serrated Trailing Edge at Low-to-Moderate Reynolds Number," *33rd AIAA Aeroacoustics Conference*.