

블레이드 통과 주파수 소음과 지연시간을 고려한 중·대형 수평축 풍력발전기의 공력소음해석

Medium·Large Horizontal Axis Wind Turbine Noise Analysis Considering Blade Passing Frequency Noise and Retarded Time

김현정* . 김호건* . 이수갑†

Hyunjung Kim, Hogeon Kim, Soogab Lee

Key Words : Large Wind Turbine(대형 풍력발전기), Aerodynamic Noise(공력 소음), Acoustic Analogy(음향 유사), Airfoil Self Noise(블레이드 자체 소음), Turbulence Ingestion Noise (난류유입 소음), Retarded Time(지연시간)

ABSTRACT

Aerodynamic noise generated from wind turbines is predicted by its classified source mechanisms using computational method. BPF noise according to the blade passing motion, is modelled on monopole and dipole sources. They are predicted by Farassat 1A equation. Airfoil self noise and turbulence ingestion noise are modelled upon quadrupole sources and are predicted by semi-empirical formulas composed on the groundwork of Brooks et al. and Lowson. Retarded time is considered, not only in low frequency noise prediction but also in turbulence ingestion noise and airfoil self noise prediction. Wind turbine noise emission of a 3MW wind turbine and a 600 kW wind turbine, standing for large and middle sized wind turbines, is analyzed.

기 호 설 명

p' : acoustic pressure	Pa
ρ_0 : density of air	kg/ m ³
c_0 : speed of sound (air)	m/s
St : Strouhal number	
G : shape functions	
K : amplitude functions	
D_h : directivity factor	
δ^* : boundary layer displacement thickness	deg
α : angle of attack	m
L : blade panel semi span	m
r : distance between. source and observer	deg
θ_e : angle between observer and chord line	deg
ψ_e : angle between observer and span line	deg
s : suction side	
p : pressure side	
TIN : turbulence ingestion noise	
ASN : airfoil self noise	
TBLTE : turbulent boundary layer trailing edge noise	
SEP : separation side trailing edge noise	

LBLVS : laminar boundary layer vortex shedding noise
TIP : tip noise
TEBVS : trailing edge blunt vortex shedding noise

1. 서 론

풍력발전은 차세대 에너지 공급원으로 각광받아왔으며 해를 거듭할수록 더욱 높은 성장세를 보이고 있다. 그러나 이미 20년 전부터 많은 수의 풍력발전기를 운용해 온 유럽을 시작으로 풍력발전기 소음의 유해성에 대한 인식이 확산되었고, 최근에는 이에 대한 과학적 근거 또한 다양해져 풍력발전기의 입지 선정 및 설치에 장애를 겪고 있다.

이에 유럽과 미국에서는 풍력발전기 소음 예측에 관한 연구를 진행해왔는데, 이러한 연구들은 풍력발전기 소음 중, 영향이 큰 공력 소음, 그 중에서도 가청률이 높은 주파수 대역의 난류 유입 소음(TIN)과 블레이드 자체 소음(ASN)의 예측에 집중하였다.¹⁾ 가청 정도에 영향이 적은 저주파소음에 대한 연구는 중요하게 고려되지 않아왔다.

그러나 저주파소음의 유해성에 대한 우려가 확대되면서, 저주파소음이 인체나 가축의 생장에 악영향을 주고,

† 교신저자; 서울대학교 기계항공공학부
E-mail : solee@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-7384, Fax : (02) 876-7384

* 서울대학교 기계항공공학부

소음의 불쾌도(annoyance)증가에도 영향을 줄 수 있는 것으로 연구되었다.²⁾ 풍력발전기는 대형화에 따라 블레이드 회전수가 낮아지며, 저주파소음의 영향이 더욱 커질 것으로 예상되므로 풍력 터빈의 저주파대역 BPF 소음의 예측과 평가에 관한 연구가 더욱 필요해질 것이다.

현재까지는 풍력발전기가 위치가 고정되고 회전속도가 느린 구조물이므로 그 소음해석에 있어서 지연시간의 영향을 고려하지 않아왔다. 그러나 풍력발전기의 대형화에 따라 블레이드가 커지게 되어 소음원들이 블레이드를 따라 넓은 영역에 분포되므로 수음점까지 소음이 도달할 때 지연시간의 효과를 무시할 수 없게 된다.

본 논문에서는 BPF소음과 지연시간을 고려한 풍력발전기 공력소음 해석의 기법과 적용에 대해 기술하였으며, 600kW 중형급 풍력발전기와 3MW 대형급 풍력발전기의 소음해석을 수행함으로써 중형과 대형 풍력발전기의 소음 발생 특징을 비교하였다.

2. 소음원의 모델링 및 예측기법

블레이드 통과 주파수(BPF) 소음의 예측은 Ffowcs Williams Hawkins(FW-H)의 음향상사법에 기초하여 수행하였다. 음향상사법의 수치적 해석을 위해 Farrasat의 1A식을³⁾ 이용하였고, 난류 유입 소음(TIN)과 블레이드 자체 소음(ASN)의 해석은 Lowson의 식과⁴⁾ Brooks, Pope, Marcolini의 반 경험식(Semi Empirical Equation)을⁵⁾ 사용하였다.

단, TIN과 ASN을 예측하기 위해 사용된 반 경험식들은 기본적으로 2D 익형의 단위 길이에 대하여 적용된다. 본 연구에서는 블레이드를 길이 방향(spanwise)으로 적절히 등분하여 각각의 패널들을 하나의 독립된 소음원으로 가정하였으며, 수음점(관찰자)의 위치에서부터 각각의 소음원까지 거리와 회전 속도에 따른 지연시간을 고려하여, 관찰자 위치에서의 소음을 예측하였다.

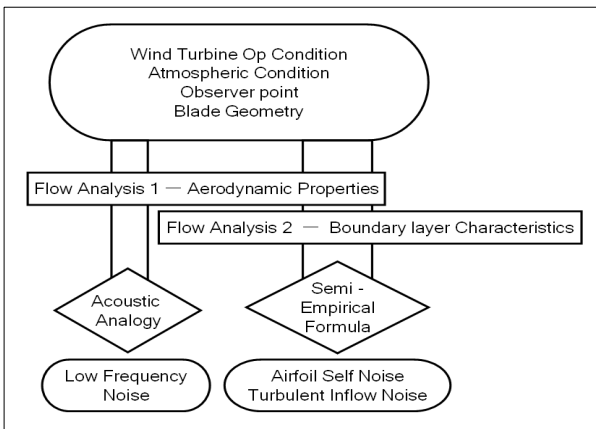


그림 1. 공력소음 예측 순서도

각각의 소음원의 소음 해석을 위해서는 유동해석이 선행 되어야 한다. 유동해석은 서울대학교 공력소음 연

구실에서 개발한 풍력발전기 공력해석 프로그램인 WINFAS⁶⁾를 사용하였고, 블레이드 경계층의 특성해석은 Drela의 X-Foil⁷⁾을 이용하였다.

2.1 공력 해석기법

WINFAS는 비정상 와류 격자 패널 기법을 기반으로 하고, 후류의 모사는 와류 고리모델을 사용한다.

2.2 소음 예측기법

(1) 블레이드 통과 주파수 소음 성분

Ffowcs Williams -Hawkings(FW-H) 음향상사법에서 사중극항을 배제하고 홀극과 이중극소음에 대하여, 수치적 해석에 용이하도록 아래와 같이 변형된 Farassat의 1A 식을 이용하여 예측한다.

$$p(\vec{x}, t) = p_T(\vec{x}, t) + p_L(\vec{x}, t) \quad (1)$$

$$4\pi p_T(\vec{x}, t) = \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 \dot{v}_n}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{\rho_0 v_n (r\dot{M}_r + c_0(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (2)$$

$$4\pi p_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{\dot{l}_r}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \int_{f=0} \left[\frac{l_r - l_M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS + \frac{1}{c_0} \int_{f=0} \left[\frac{l_r (r\dot{M}_r + c_0(M_r - M^2))}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (3)$$

(2) 난류 유입 소음(TIN)⁴⁾

$$SPL_{TIN}^H = 10 \log_{10} [\rho^2 c_0^2 l \frac{L}{r^2} M^3 \bar{w}^2 \hat{k}^3 (1 + \hat{k}^2)^{-7/3}] + C \quad (4)$$

$$SPL_{TIN}^L = SPL_{TIN}^H + 10 \log_{10} \left(\frac{K_{lfc}}{1 + K_{lfc}} \right) \quad (5)$$

(3) 블레이드 자체 소음 (ASN)

ASN은 발생 메커니즘에 따라서 다음의 다섯 가지 종류로 구분한다. 본 논문에서는 적용한 식만을 기술하였으나, 자세한 메커니즘과 구체적인 내용은 [5]에서 찾을 수 있다.

① 난류 경계층 뒷전 소음 (TBLTE)

$$SPL_{TBLTE} = 10 \log_{10} 10^{SPL_s/10} + 10^{SPL_p/10} + 10^{SPL_\alpha/10} \quad (6)$$

$$SPL_s = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 D_h L}{r^2} \right) + G_A \left(\frac{St_s}{St_1} \right) + (K_1 - 3) \quad (7)$$

$$SPL_p = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_p^* M^5 D_h L}{r^2} \right) + G_A \left(\frac{St_p}{St_1} \right) + (K_1 - 3) + \Delta K_1 \quad (8)$$

② 실속과 박리 소음 (SEP)

$$SPL_\alpha = 10 \log_{10} \left(\frac{\delta_s^* M^5 D_h L}{r^2} \right) + G_B \left(\frac{St_s}{St_2} \right) + K_2 \quad (9)$$

③ 층류 경계층 소음 (LBLVS)

$$SPL_{LBLVS} = 10\log_{10}\left(\frac{\delta_p M^5 D_h L}{r^2}\right) + G_1\left(\frac{St}{St_{peak}}\right) + G_2\left(\frac{Re}{Re_0}\right) + G_3(\alpha) \quad (10)$$

④ 팁 소음 (TIP)

$$SPL_{TIP} = 10\log_{10}\left(\frac{M^2 M_{tw}^5 D_h L_{tw}^2}{r^2}\right) - 30.5(\log St + 0.3)^2 + C \quad (11)$$

⑤ 몽푁한 뒷전 소음 (TEBVS)

$$SPL_{TEBVS} = 10\log_{10}\left(\frac{t^* M^{5.5} D_h L}{r^2}\right) + G_4\left(\frac{t^*}{\delta_{avg}^*}, \Psi_{TE}\right) + G_5\left(\frac{t^*}{\delta_{avg}^*}, \Psi_{TE}, \frac{St}{St_{peak}}\right) \quad (12)$$

3. 소음예측 기법의 타당성

본 연구는 [11]의 연구를 바탕으로 하였으며, 공력해석과 소음해석 코드의 검증은 [11]에 기술되었다.

4. 소음예측 결과

600kW급 중형 풍력발전기인 VS45와⁸⁾ 3MW급 대형 풍력발전기인 GH의 블레이드 디자인⁹⁾을 참고하여 실제 운용 범위 내의 정상상태에 대하여 해석하였다.

그림 4와 그림 5에서 풍력발전기의 소음원별 소음의 스펙트럼을 나타내었다. TSR 8.5, 끝단 속도 76.5m/s, 유입류를 9m/s로 고정하고, 예측 기준 위치는 IEC 61400-11의 규정에¹⁰⁾ 따라 지면에서 발전기 정면으로부터 180°인 (허브높이(h)+로터직경/2) 만큼 떨어진 거리(d)로 설정하였다. 몽푁한 뒷전 소음(TEBVS)성분은 최소한의 발생조건으로 제한하였다.

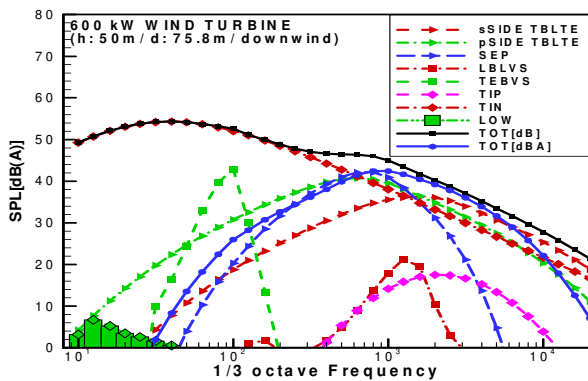


그림 4. 1/3 옥타브 주파수 스펙트럼에 대한 소음원별 소음 분포 - 600kW

일반적으로 난류경계층 뒷전 소음(TBLTE)과 TIN은 풍력발전기 광대역소음이고, 층류 경계층 소음(LBLVS)과 몽푁한 뒷전 소음(TEBVS)은 준 톤 소음성분으로 알려져 있다. LBLVS는 소형 풍력발전기에서 주로 나타나

는데¹⁾, 3MW발전기의 2kHz대역에서도 두드러지는 것을 확인할 수 있다. 3MW발전기 블레이드의 Inboard 부분은 상대적으로 낮은 레이놀즈 영역과 높은 유효 받음각에서 운용되는데, 받음각이 커지면 압력면에서 더 큰 층류 특성을 띄어, LBLVS가 크게 나타나기 때문이다.⁵⁾ 허브로부터 같은 거리에 있는 수음점에서 소음을 비교했을 때 3MW발전기의 소음이 600kW발전기 소음보다 더 크게 나타나는 것은 이 성분의 영향인 것으로 판단된다.

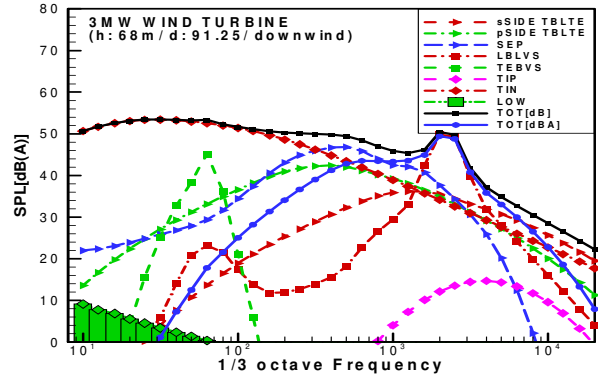


그림 5. 1/3 옥타브 주파수 스펙트럼에 대한 소음원별 소음 분포 - 3MW

그림 6은 3MW발전기와 600kW발전기에서 발생하는 소음을 BPF에 대하여 나타낸 그래프로, 3MW발전기에서 600kW 발전기에서 보다 큰 회전에 의한 소음이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 소음 성분의 전체 소음도에 대한 영향은 TIN에 비하여 낮아 영향이 작으나, Infrasound 영역인 BPF 성분의 낮은 주파수 영역에서는 크게 나타난다. 또한 저주파대역의 BPF 소음성분과 Infrasound는 A-weighting된 전체 소음도에는 큰 영향을 미치지 못하지만, 인체나 동식물에 영향을 줄 수 있다는 연구가 진행되고 있어, 현재의 풍력소음 해석에서 그 중요성을 간과할 수 없을 것으로 생각된다.

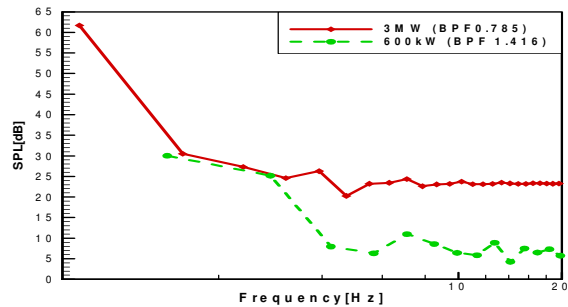


그림 6. BPF에 대한 소음도 비교

그림 7과 그림 8에서는 3MW급 발전기와 600kW급 발전기의 지연시간 고려여부에 따른 수음자 위치의 시간에 대한 음압레벨의 변화를 비교하였다. 지연시간을 고려하지 않은 계산의 경우, 회전하는 블레이드의 한 정지각에서의 블레이드의 모든 패널로부터 방사되는 소음을 종합하였다. 예측조건은 위와 동일하나, 예측위치는 블레이드의 회전에 따라 음압의 변화폭이 가장 큰 90° (블레이드의 회

전면)로 설정하였다.

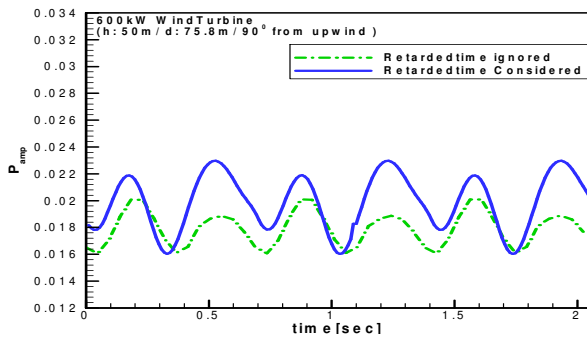


그림 7. 수음점 시간에 대한 P_{amp} 의 분포 - 600kW

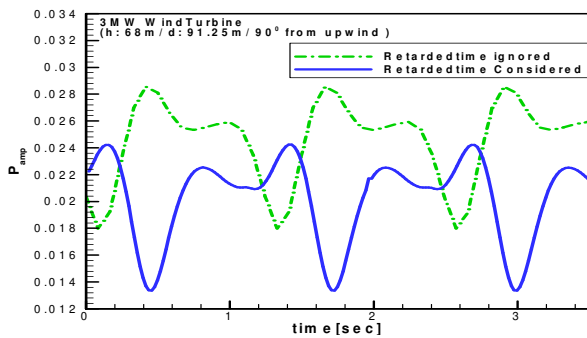


그림 8. 수음점 시간에 대한 P_{amp} 의 분포 - 3MW

중대형 풍력발전기의 소음해석에서 지연시간의 영향을 알아보기 위해 주파수에 따른 소음도를 음압의 크기로 환산하여 합산해 전체음압(P_{amp})으로 나타내어 보았다. 이 값은 소음원들 간의 위상차에 의한 상쇄와 중첩의 효과는 고려하지 않고 각 소음원의 음압크기를 단순히 합하여 계산하여 한계를 갖는다. 그림 7과 그림 8의 비교를 통해, 3MW발전기가 600kW발전기보다 음압의 변화폭이 크고, 지연시간 고려 여부에 따른 음압 개형의 차이가 3MW발전기에서 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이에 풍력 발전기가 대형화 될수록 소음예측에서 지연시간의 고려가 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 풍력발전기에서 발생하는 공력소음을 수치 해석적 접근을 통하여 예측하였다. 풍력발전기가 대형화됨에 따라 소음예측에서 저주파소음이 중요하게 대두되고, 소음 방사의 지연시간 고려가 필요해짐에 주목하였다. 저주파 대역의 BPF 소음 성분의 예측은 음향상사법을, 광대역소음 성분인 난류유입 소음(TIN)과 블레이드 자체 소음(ASN)의 예측에는 반 경험식을 이용하였으며, 이 때 지연시간을 고려하여 소음 예측의 정확도를 높였다.

3MW급 풍력발전기와 600kW급 풍력발전기 발생 소음의 비교를 통해 대형급 풍력발전기의 저주파 대역의 BPF 소음 출력이 더 큰 것을 확인하였고, 대형급 풍력

발전기의 층류 경계층 소음이 두드러짐에 따라 중형급 풍력발전기에 비해 전체 소음도가 커짐을 확인하였다.

앞으로의 연구에서는 후류가 타워, 나셀과 같은 구조물을 만나게 되는 현상, yaw error, wind shear 등의 여러 비정상 공력상태를 고려한 소음해석을 수행해 실제로 다양한 비정상 상태에 노출되어 있는 풍력발전기의 소음예측을 해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 출연금으로 수행한 최우수 실험실사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] S.Wagner, R.Bareiss, G.Guidati, 1996, "Wind Turbine Noise", pp.72, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [2] J.T.Davis, J.Davis, 2007, "Noise Pollution from Wind Turbines", Wind Turbine Noise 2007
- [3] F.Farassat, Kenneth S. Brentner, 1998, "The Acoustic Analogy and the Prediction of the Noise of Rotating Blades", Theoretical and Computational Fluid Dynamics
- [4] Lawson, M.V., December 1992, "Assessment and Prediction of Wind Turbine Noise Flow Solutions", Report 92/19,ETSU W/13/00284/REP, pp 1-59
- [5] Brooks, F.T., Pope,D.S., Marcolini.M.A., 1989 , "Airfoil Self-noise and Prediction", NASA Reference Publication 1218, pp. 1-145, National Aeronautics and Space Administration, USA
- [6] 김호건, 신형기, 이수갑, 2007, "포텐셜 유동을 기반으로 한 풍력 터빈 블레이드의 공력 해석 및 후류 예측 기법에 관한 연구", 2007년도 춘계학술대회논문집, 한국 신재생 에너지 학회
- [7] Drela, M., 1989, "An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils", Conference on Low Reynolds Number Aerodynamics, University Notre Dame
- [8] "Aerodynamic Noise Reduction for Variable Speed Turbines", 2000, ETSU W/45 /00504/REP, pp.1-44
- [9] 정지영,신형기,이수갑, 2006,"해상용 대형 풍력 발전 시스템의 개념 설계와 기본 설계에 관한 연구",2006 한국신재생 에너지학회 춘계 발표대회,
- [10] IEC 61400-11, 2002-12, " Wind Turbine Generator Systems-Part 11: Acoustic noise measurement techniques"
- [11] 김현정, 김호건, 이수갑, 2007, "수평축 풍력발전기의 저주파소음을 포함한 광대역소음 해석에 관한 연구", 한국신.재생 에너지 학회지, 2007-09-FC-006