

큰 반경의 원운동을 하는 점 음원에 의한 저주파수 스위싱 음장 분석

Study on Low Frequency Swishing Sound Field by a Singularity in Circular Motion with Large Radius

이 광 세* · 정 철 응†

Gwang-Se Lee and Cheolung Cheong

(Received April 28, 2014 ; Revised June 24, 2014 ; Accepted July 4, 2014)

Key Words : Lowson Acoustic Analogy(Lowson 음향상사식), Wind Turbine Noise(풍력터빈 소음), Low Frequency Noise(저주파수 소음), Swishing Noise(스위싱 소음)

ABSTRACT

In order to investigate low frequency swishing noise of wind turbines, acoustic source model using a singularity in circular motion is introduced to derive analytic solution of Lowson acoustic analogy in time domain. Results in time and frequency domains computed by the solution show apparent modulation of amplitude and frequency. The solution indicates that time histories of acoustic pressure at receiver points varied significantly according to receiver's directional location, even when the retarded time distributions are similar. However, the corresponding time-averaged spectra of sound pressure at the receiver locations where the retarded time distributions are almost same are not significantly different. It can be inferred from these results that the time-averaged sound pressure spectra which cannot take into account the detailed difference in the time-variation of wind turbine noise may not represent the sound quality of wind turbines due to its swishing. Finally, as an introduction of procedure to quantify low frequency swishing noise level, relative variation of overall sound pressure level is obtained using tonal low frequency noise model.

1. 서 론

중대형 수평축 풍력터빈은 일반적인 산업용 팬과 달리 상대적으로 매우 큰 반경으로 천천히 회전한다. 이러한 거동은 스위싱(swishing)이라는 독특한 터빈 방사소음의 특성을 야기한다. 스위싱 특성은 비슷한 음압레벨을 방출하는 타 기기들에 비해 터빈

소음을 더욱 성가시게 만드는 것으로 알려져 있다.

스위싱은 풍력터빈의 블레이드-통과-주파수(blade-passing-frequency, 이하 BPF)에 대응하는 주기 내 변조(modulation)하는 방사음압에 기인한다. 중대형 풍력터빈의 경우 1차 BPF에 대응하는 주기인 대략 1초 동안 스위싱 현상이 주로 발생한다. Lee 등의 빔-형성 기법을 이용한 터빈 소음의 음원 가시화 결과는 날개-깃 회전면(rotor plane) 상 특정 지점에서

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University
E-mail: ccheong@pusan.ac.kr
Tel: +82-51-510-3205

* School of Mechanical Engineering, Pusan National University

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2014 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

의 큰 방사소음 기여도를 확인하였다^(1,2). 이는 1차 BPF 대응 주기 마다 해당 위치에서 변조 된 소음이 방사 한 것을 뜻하므로, 터빈 소음의 스위칭 특성을 보여주는 예로 들 수 있다. Cheong과 Joseph은 주파수 영역대에 따라 스위칭 특성이 다르게 나타남을 보고하였다⁽³⁾. 등가소음도 측면 뿐 만 아니라, 그들이 개발한 스위칭 정량화 단위인 스위칭 지수 크기 (swishing index level) 역시 저주파수역대에서 기여도가 지배적이었다. 풍력단지 환경소음을 평가하는 측면에서 보았을 때, 고주파수의 소음은 저주파 소음에 비해서 기여도가 상대적으로 낮다. 이것은 단지 외부로의 원거리전파 시 대기흡음 등에 의한 고주파수 소음의 큰 감쇠 때문이다. 반면 저주파수 소음은 비교적 큰 감쇠없이 원거리 전파를 한다. 즉, 단지로부터 멀리 떨어진 발전단지 주변 거주자들은 저주파수 스위칭 소음을 주요 환경소음문제로 제기할 수 있다.

이 연구는 Lawson의 음향상사식을 바탕으로 이극자(dipole) 소음원 모델을 도입하여 회전하는 점 음원에 의한 방사소음 예측식을 시간영역에서 유도하였다. 주어진 식을 이용하여, 풍력터빈 날개 상의 소음원과 유사한 거동을 하는 단일 점 음원에 의한 저주파수 소음의 스위칭을 특성을 분석하였다. 분석 결과를 기초로 스위칭을 정량적으로 평가할 수 있는 방법론을 제시하였다.

2. 단순 점 소음원 방사소음 모델

2.1 소음원 모델링

Fig. 1에서 회전하는 소음원에 의한 음향장 해석을 위하여 도입한 좌표계를 나타내었다. 해당 좌표계에

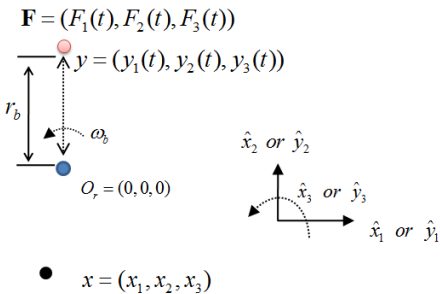


Fig. 1 Schematic description of simple singularity in circular motion

근거하여 소음원은 다음 식과 같이 점 음원으로 모델링 하였다.

$$F = (0, 0, A_0 \cos(\omega_b t + \phi_s)) \tag{1}$$

여기서, A₀는 소음원 모델의 크기 이며, ω_b는 음원 주파수이다. 이 연구에서 식의 단순화를 위해 음원 고유의 위상(φ_s)은 무시하였다. 식 (1)으로 모델링 한 음원은 원점 O_r을 중심으로 r_b떨어진 지점에서 회전 속도 ω_b로 회전하여 다음과 같이 정의한 궤적 y(t)을 따라 이동한다.

$$y = (-r_b \sin(\omega_b t), r_b \cos(\omega_b t), 0) \tag{2}$$

이 논문에서, 회전속도와 원점과 소음원간 거리는 현재 운행되고 있는 상용 메가와트 용량의 터빈과 유사하게 모델링 하였다. 이 후 이 논문 내 모든 예측에서 x₁은 예측 조건에 따라 다르며, 타워 높이와 IEC 61400-11⁽⁴⁾규정에 대응하여 각각 x₂=70 m, x₃=110 m이다.

2.2 Lawson 음향상사식을 이용한 전파모델

균일 속도로 병진 운동을 하는 음원에 의한 방사 소음은 Lighthill에 의해 유도 되었고, 이를 바탕으로 Lawson은 일반적으로 움직이는 음원에 의한 음장을 다음식과 같이 유도하였다⁽⁵⁾.

원음장항:

$$p_f(t) = \left[\left(\frac{x_i - y_i}{4\pi a_0 r^2 (1-M_r)^2} \right) \left(\frac{\partial F_i}{\partial t} + \frac{F_i}{1-M_r} \frac{\partial M_r}{\partial t} \right) \right] \tag{3}$$

근음장항:

$$p_n(t) = \left[\frac{1}{4\pi r^2 (1-M_r)^2} \left(\frac{F_i(x_i - y_i)(1-M^2)}{r} \frac{(1-M^2)}{(1-M_r)} - F_i M_i \right) \right] \tag{4}$$

여기서, x_i, y_i(i=1,2,3)는 각기 수음점과 음원에 대응하는 좌표계, M_r은 벡터 r방향의 음원 마하수, M은 음원의 마하수, 벡터 r은 음원에서 수음점으로 향하는 벡터, r은 벡터 r의 크기, a₀는 음속, F_i는 점-힘 (force singularity)을 나타내고 ‘[]’은 지연시간 (retarded time)에서의 값을 나타낸다. Lawson은 그의 논문에서 음장을 거리 감쇠비에 따라 식 (3)과 (4)로 각각 원음장항 p_f과 근음장항 p_n으로 분리하여 제시

하였다. 하지만 이 연구 내에서, 관심 주파수에 상관없이 두 항을 더한 전체음압 p_r 를 소음 예측 시 계산하였다.

식 (3)과 (4)에 식 (1)과 (2)를 대입 하면 다음과 같다:

원음장항,

$$p_f(t) = a_0^2 \left[D_r^2 S_0 \left(\begin{array}{l} -x_3 \omega_s A_0 \sin(\omega_s \tau) \\ + K_0 \cos(\omega_s \tau) \left(r_b^2 + \frac{R}{2} \sin(\omega_b \tau + \phi_b) \right) \right) \right], \quad (5)$$

근음장항,

$$p_n(t) = a_0^2 \left[\begin{array}{l} D_r^3 a_0 S_0 x_3 \\ A_0 \cos(\omega_s \tau) \left(1 - \omega_b^2 r_b^2 / a_0^2 \right) / r \end{array} \right], \quad (6)$$

여기서,

$$K_0 = D_r x_3 A_0 \omega_b^2 / a_0 r, \quad (7)$$

$$D_r = \frac{a_0 r}{\left(a_0 r + \omega_b r_b \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \sin(\omega_b \tau + \phi_{b1}) \right)}, \quad (8)$$

$$S_0 = \left(4\pi a_0^3 r^2 \right)^{-1}, \quad (9)$$

$$R = 2r_b \sqrt{x_1^2 + x_2^2}, \quad (10)$$

$$\phi_b = \tan^{-1}(-x_2 / x_1), \quad (11)$$

$$\phi_{b1} = \tan^{-1}(x_1 / x_2). \quad (12)$$

풍력터빈으로부터 방사하는 소음을 지면에서 예측한다고 고려하면, x_2 는 타워 높이에 의해 상수가 되므로 음압 변동에 관련한 식 (11)과 (12) 두 위상 변수는 x_1 의 함수가 된다. 이는 각 수음점들 대비 음원 회전에 따른 지연시간 분포가 유사할 경우, x_1 은 음압의 파형 결정에 있어 주요한 변수가 될 것임을 암시한다.

3. 예측 결과

Fig. 2는 식 (5)와 (6)을 이용하여 예측한 음압이

며, 예측 지점은 IEC 61400-11⁽⁵⁾의 소음평가 시 기준 위치와 동일한 터빈 하류 지점이다. 또한, 주어진 음원 주파수를 회전주파수와 동일하게 간주하였다($\omega_s = \omega_b$). 고도 별 변동하는 풍속에 의해, 회전하는 터빈 날개-깃 상 평균적인 압력분포는 터빈 회전주기와 동일한 주기로 섭동 할 것이다. 즉, 회전주파수와 음원주파수를 동일하도록 음원을 모델링하면, 고도 별 풍속 분포와 회전하는 날개-깃에 따른 음원 섭동에 대응하는 음장을 관찰 할 수 있다.

음원영역의 대표길이와 음원의 파장 간의 비로부터 음원의 컴팩트성(compactness)를 판단할 수 있다. 터빈 소음원은 회전하므로 음원영역 대표길이를 회전체적으로 고려하면, Fig. 2의 결과는 음원의 파장 대비 대표길이의 비가 $0.2(=2r_b/\lambda)$ 인 경우이다. 대표 길이는 파장대비 작으므로 음원은 컴팩트(compact)하다. 실제 터빈 날개-깃 상 모든 국부소음원을 모델링 하더라도 충분히 낮은 주파수를 고려 할 경우, 각 국부소음원간 위치 차이에 따른 위상차 영향이 미소하므로 저주파수영역대에서 터빈의 날개-깃 상의

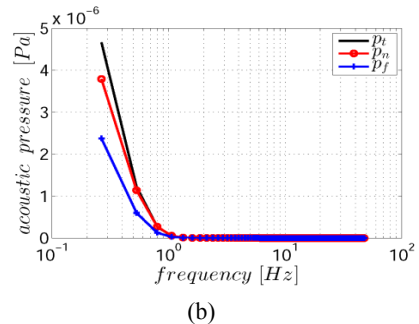
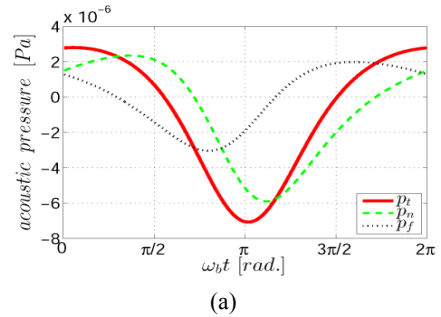


Fig. 2 Total acoustic pressure p_r and acoustic pressures due to near-field term p_n and far-field term p_f obtained by exact solution; (a) Acoustic along with blade rotational angle in a receiver time; (b) Corresponding spectrum

소음원은 단순 점 음원으로 모델링 가능하다. 또한 에어포일 형상에서 방사되는 저주파수 소음의 방향성은 단순 이극자와 유사하므로, 위 음원 주파수를 고려할 때 식 (1)의 음원 모델은 그 방향성도 물리적으로 크게 벗어나지 않는다고 할 수 있다. 그러므로 관심 주파수가 충분히 낮다면, 주어진 터빈 날개-깃의 소음원이 콤팩트하므로 하나의 점 음원으로 간단히 식 (1)과 같이 모델링 할 수 있다.

Fig. 2(a)는 주어진 수음점에서 근음장항과 원음장항에 대응하는 순간음압이 회전에 따라 상이한 분포를 가지는 것을 보여준다. 회전구간을 90°간격으로 나누어 고려한다면, 근음장항은 90°에서 180° 구간, 원음장항은 180°에서 270° 구간에서 순간음압이 크게 변화함을 확인할 수 있다. 스위싱특성은 시간진행에 따른 순간음압 추적을 통해 분석하므로 근음장항과 원음장항에 대응하는 음압은 상이한 스위싱 특성을 가질 것으로 추론 할 수 있다.

Fig. 2(b)는 큰 궤적을 따라 회전하는 단일 주파수의 음원이 수음점에서 보다 넓은 주파수 범위의 음압으로 변조되어 기여하는 것을 나타낸다. 이는 단일 주파수 소음원의 음향에너지가 도플러 효과에 의해 주위 주파수로 분산되었기 때문이다. Fig. 2의 결과로부터 터빈 소음의 주파수변조(frequency modulation) 현상의 원인을 부분적으로 이해할 수 있다. 이는 저주파수 소음 측정 시 풍력터빈의 고차 BPF 소음의 순음성이 뚜렷하게 확인되지 않는 이유로 고려할 수 있다⁽⁶⁾.

Fig. 3은 두 수음점에서 소음원 회전각도에 따른 순간음압의 분포를 나타내며, 여기서 식 (11)과 (12)의 위상변수들은 강제로 '0'으로 두었다. 각 순간음압은 해당 전체 순간음압 중 최대값으로 정규화 하였다. 두 수음점 위치는 x_1 은 각각 -100 m와 100 m, $x_2=-70$ m, $x_3=110$ m이다. Fig. 4는 두 수음점의 지연시간 분포가 유사함을 보여준다. Fig. 3과 4는 위상변수 ϕ_b 와 ϕ_{b1} 의 영향을 무시 할 경우 두 수음점에서의 지연시간 분포가 유사하다면 x_1 의 위치에 상관없이 음압의 파형이 비슷함을 나타낸다.

Fig. 5는 위상변수들을 고려하였을 때, 각각의 수음점에서의 음압 파형을 나타낸다. 위상변수들을 고려 할 때 지연시간 분포가 유사한 경우에도 파형의 상이함을 나타낸다. 여러 수음점 간 지연시간 분포가 유사하다면, 식 (5)와 (6) 내 r 과 R 또한 거의 같아서

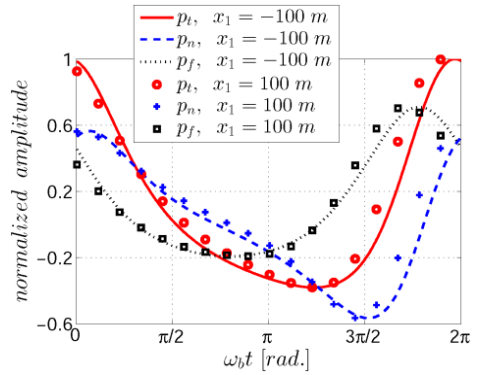


Fig. 3 Normalized total acoustic pressure p_t and acoustic pressure due to near-field term p_n and far-field term p_f obtained by exact solution at $x_1=-100$ m and 100 m for $\phi_b=\phi_{b1}=0$

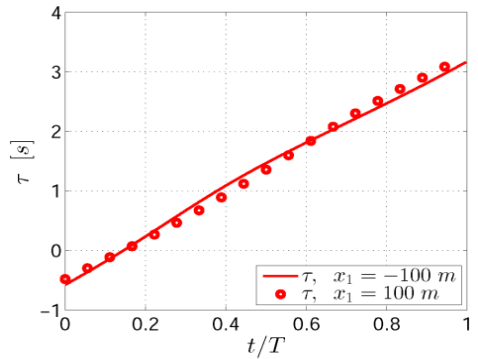


Fig. 4 Distribution of retarded time according to uniform reception time normalized by period for a cycle at observers of $x_1=-100$ m and 100 m

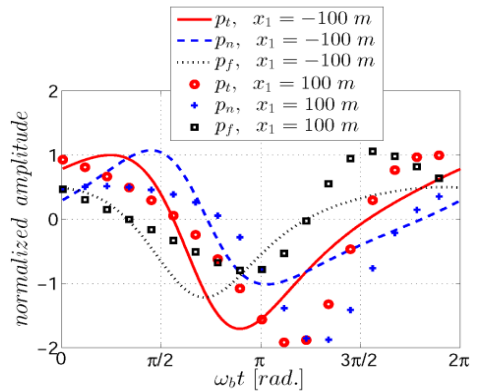


Fig. 5 Normalized total acoustic pressure p_t and acoustic pressures due to near-field term p_n and far-field term p_f obtained by exact solution at $x_1=-100$ m and 100 m

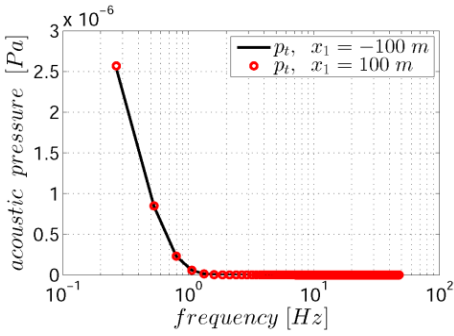
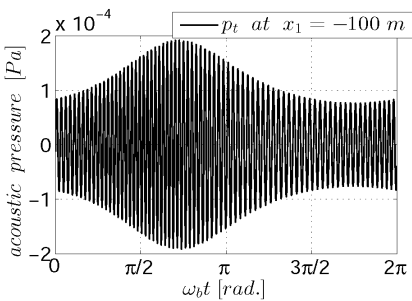
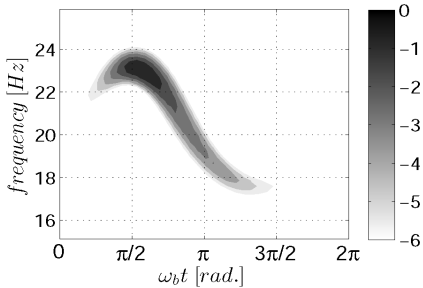


Fig. 6 Spectrum of total acoustic pressure p_t using exact solution at $x_1=-100$ m and 100 m



(a) Time history of acoustic pressure



(b) Spectrogram of acoustic pressure

Fig. 7 Time history and spectrogram of total acoustic pressure, p_t , by rotating acoustic source with a frequency, 20 Hz, during a cycle at $x_1=-100$ m

그 영향이 적을 것이며, 두 수음점간 음압 차이는 단지 위상변수들에 의해 큰 영향을 받을 것으로 추론한다. 큰 반경으로 회전하는 저주파수 소음원, 즉 터빈 저주파수 소음원의 경우 타워로부터 떨어진 거리가 동일 할 경우에도 x_1 의 위치에 따라 시간영역에서의 방사소음 특성이 상이 할 것이다.

Fig. 6은 Fig. 5의 결과에 대한 주파수 스펙트럼을 나타내고 있다. 흥미로운 사실은 x_1 의 위치에 따라

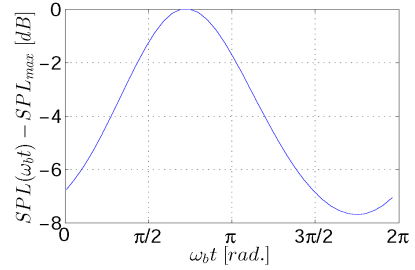


Fig. 8 Relative variation of sound pressure level during a cycle for frequency range between(14~25 Hz)

시간영역에서의 방사소음 특성이 변하지만, 그 방사소음의 평균 스펙트럼은 거의 동일하다는 것이다. 이로부터 유사한 등가소음도일 경우에도 상이한 스위칭 특성을 가질 수 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 7은 음원의 주파수가 20 Hz인 경우, $x_1=-100$ m에서의 음압신호와 해당 신호의 스펙트로그램(spectrogram)을 나타낸다. 20 Hz는 터빈 방사소음 평가 시 저주파수 하한값이다⁽⁵⁾. 개발한 모델을 현재 터빈 방사소음 평가 주파수 범위 내에서 적용하기 위해, 최저주파수 범위인 20 Hz를 택하였다. 이는 이 모델이 저주파수의 터빈 소음에 대하여 보다 정확한 모델링을 구현 할 수 있기 때문이다.

진폭변조가 시간영역 예측 결과에서 확연하게 확인되며, 날개-깃이 지면으로 향하는 회전 각도($\pi/2 < \omega_b t < \pi$)에서 큰 진폭변조를 가지는 것을 알 수 있다. 스펙트로그램은 음압의 진폭변조와 더불어 주파수변조를 동시에 나타내며, 주파수변조 영역이 시간에 따라 섭동하는 것을 보여준다. 위 분석은 터빈과 같이 큰 반경으로 느리게 회전하는 소음원의 진폭과 주파수 변조 현상을 여실히 보여준다.

Fig. 8은 Fig. 7의 스펙트로그램 내 음압이 크게 분포하는 14~25 Hz 사이의 음압에 대응하는 수음점에서의 전체음압크기의 회전에 따른 상대적 변동 값을 나타낸다. 해당 예측의 경우, 1회전 시 최대 약 7 dB의 음압변동 양상을 확인할 수 있다.

4. 결 론

이 논문에서는 먼저 회전하는 이극자 소음원에 의하여 발생하는 음장에 대한 이론적 예측식을 Lowson의 음향상사식을 기초로 유도하였다.

지연시간이 비슷한 수음점에서 개발한 예측식 상의 위상변수가 시간영역에서의 파형을 결정하는 주요한 요소임을 확인하였다. 개발한 모델을 이용하여 큰 궤적을 따라 느리게 회전하는 터빈 날개-깃을 이극자 점음원으로 모델링하고 터빈 방사소음 평가 시 가청주파수 내 최소값인 20 Hz에서의 저주파수 소음원에 대응하는 음압의 변조특성을 시간영역에서 고찰하였다. 그리고 예측 음압에 대한 스펙트로그램을 통해 진폭변조 뿐 만 아니라 주파수 변조현상을 확인하였다. 끝으로, 음원 회전에 따른 전체음압크기의 섭동을 계산하여 스위싱 특성을 정량화 하였다.

이와 같이 이극자 점 음원을 이용한 예측방법은 풍력터빈의 저주파수 영역대 내 스위싱 소음 분석에 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있다. 향후, 음원을 단순 이극자 모델이 아닌 뒷진 소음 또는 유입 소음으로 모델링 한다면 가청주파수 영역에서의 터빈 소음의 변조 특성 또한 확인 할 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부의 산업융합원천기술개발사업(10045337)에 의하여 지원되었으며, 또한 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2013R1A1A2012672).

References

- (1) Lee, G.-S., Shin, S.-H., Cheong, C. and Jung, S.-S., 2009, Localization of Acoustic Sources on Wind Turbine by Using Beam-forming Techniques, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 809~815.
- (2) Lee, G.-S., Cheong, C., Shin, S.-H. and Jung, S.-S., 2012, A Case Study of Localization and Identification of Noise Sources from a Pitch and a Stall Regulated Wind Turbine, Applied Acoustics, Vol. 73, pp. 817~827.
- (3) Cheong, C. and Joseph, P., 2014, Cyclostationary

Spectral Analysis for the Measurement and Prediction of Wind Turbine Swishing Noise, Journal of Sound and Vibration, Vol. 333, pp. 3153~3176.

(4) IEC 61400-11:2002 Wind Turbines - Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques, International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland.

(5) Lowson, M. V., 1965, The Sound Field for Singularities in Motion, Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 286, No. 1407, pp. 559~572.

(6) Jung, S. S., Cheung, W.-S., Cheong, C. and Shin, S.-H., 2008, Experimental Identification of Acoustic Emission Characteristics of Large Wind Turbines with Emphasis on Infrasound and Low-frequency Noise, Journal of the Korean Physical Society, Vol. 53, No. 4, pp. 1897~1905.



Gwang-Se Lee received his B.S. and M.S. in School of Mechanical Engineering from Pusan National University 2009 and 2011. He is now a Ph.D. student in School of Mechanical Engineering at Pusan National University. His current research interest is broadband noise from open rotor system including time-averaged and cyclic components.



Cheolung Cheong received his B.S. in Aerospace Engineering from Seoul National University 1997. He received his M.S. and Ph.D. degrees in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University in 1999 and 2003. He is now an associate professor at School of Mechanical Engineering at Pusan National University in Pusan, Rep. of Korea. Dr. Cheong's current research interests include compressor noise, fan broadband noise, wind turbine noise, computational aeroacoustics.