

빔-형성 기법을 이용한 풍력 터빈 음원의 국부화[#]

Localization of Acoustic Sources on Wind Turbine by Using Beam-forming Techniques

이 광 세*·신 수 현*·정 철 웅†·정 성 수*

Gwang-Se Lee, Su-Hyun Shin, Cheolung Cheong and Sung-Soo Jung

(2009년 4월 27일 접수 ; 2009년 6월 26일 심사완료)

Key Words : Wind Turbine Noise(풍력터빈 소음), Beam-forming Method(빔-형성 기법), Inflow Broadband Fan Noise(유입 유동 광대역 팬 소음), Airfoil-self Noise(에어포일 자가소음), Power Regulation Methods(출력 제어 방식)

ABSTRACT

The previous work(Cheong et al., 2006) where the characteristics of acoustic emissions of wind turbines has been investigated according to the methods of power regulation, has showed that the acoustic power of wind turbine using the stall control for power regulation is more correlated with the wind speed than that using the pitch control. In this paper, basically extending this work, the noise generation characteristics of large modern upwind wind turbines are experimentally indentified according to the power regulation methods. To investigate the noise generation mechanisms, the distribution of noise sources in the rotor plane is measured by using the beam-forming measurement system(B&K 7768, 7752, WA0890) consisting of 48 microphones. The array results for the 660 kW wind turbine show that all noise is produced during the downward movement of the blades. This result show good agreement with the theoretical result using the empirical formula with the parameters: the convective amplification; trailing edge noise directivity; flow-speed dependence. This agreement implies that the trailing edge noise is dominant over the whole frequency range of the noise from the 660 kW wind turbine using the pitch control for power regulation.

1. 서 론

에너지원 고갈과 환경오염으로 인해 신재생에너지 원의 하나로 풍력발전이 주목 받고 있다. 그러나 풍력발전이 널리 보급된 유럽을 중심으로 풍력터빈

방사소음으로 인한 환경소음 분쟁이 증가하고 있으며, 이로 인해 풍력터빈의 설치 및 운용이 어려움을 겪고 있다. 이러한 풍력터빈 환경소음 문제의 과학적 근거와 기초자료를 확보하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.

최근 제조되는 풍력터빈의 경우 기계적인 진동소음의 감소와 더불어 공력소음이 주요한 방사소음의 원인으로 작용하고 있다. 풍력터빈의 공력소음원 중 회전익의 회전속도와 회전익 개수의 곱에 비례하는 주파수에서 나타나는 블레이드 통과주파수 소음은 가청주파수 영역 이하에서 나타나기 때문에 가청주파수 영역에서는 난류 유입 소음과 에어포일 자가소음으로 구성되는 광대역소음이 주요하다^(1,2). 기존

† 교신저자; 정철웅, 부산대학교 기계공학부
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr
Tel : (051)510-2311, Fax : (051)514-7640
* 부산대학교
** 정철원, 한국표준과학연구원

이 논문은 2009 춘계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

연구들에 따르면 풍력터빈의 사양에 따라 난류 유입 유동소음이나⁽³⁾ 에어포일 자가 소음원들 중 난류경계층-날개 끝단(turbulence boundary layer trailing edge, 이하 TBL-TE)의 상호작용에 의한 소음이 주요한 풍력터빈 소음원들로 보고되고 있다^(4,5).

하지만 국내의 풍력자원의 경우 풍자원의 질 및 풍력터빈 입지 환경이 국외와 큰 차이를 보이고 있어 방사소음 특성 및 주요한 소음원 분석을 위한 실제 풍력터빈의 소음 측정이 필요한 실정이다. 이에 정철웅 등⁽⁶⁾은 제주도에서 운행중인 풍력터빈에 대해서 IEC61400-11규격에 맞추어 방사소음을 측정하고 이를 바탕으로 출력제어 방식에 따라 풍속과 방사소음 간의 연관성에 차이가 남을 밝혔다. 또한 풍속과 출력제어 방식에 따른 저주파 영역의 방사 소음을 분석함으로써 풍력터빈 방사소음의 잠재적 위험성에 대하여 분석하였다^(7,8).

하지만 이와 같은 연구들의 경우 IEC61400-11 규정을 적용하여 방사소음의 주파수 별 특성 및 풍속연관성을 파악 할 수 있는 실험이었으나, 실제 주요 소음원 기여도 파악을 위한 직접적인 근거를 제시하지 않았다. 이에 따라 국내 풍력터빈 요건에 보다 적합한 방사소음예측 및 방사소음저감을 위한 회전익 설계를 위해 각 소음원 파악을 목적으로 한 실험적 접근이 필요하다⁽⁶⁻⁸⁾. 이 논문에서는 풍력터빈 방사 소음원을 파악하기 위해 빔-형성(beam-forming, 이하 BF) 기법을 이용한 음장가시화를 시도하였다. 또한 실험적인 음장가시화 결과의 타당성을 분석하기 위하여 풍력터빈 방사소음에 대한 준경험식을 활용하여 이론적인 음장가시화 결과도 함께 제시하였으며 상호 비교를 통하여 대상 풍력터빈의 주요 소음원에 대한 분석결과를 제시하였다.

2. 측정 개요

2.1 측정 대상 풍력터빈

측정 대상 풍력터빈은 제주도 행원 풍력발전 단지내의 660 kW 출력 풍력터빈으로 사양은 Table 1과 같다. 제주도 행원 풍력발전단지는 600 kW에서 750 kW까지의 용량을 가진 15기의 풍력터빈들로 구성되어 있다. 특별히 660 kW 용량의 풍력터빈을 실험 대상으로 정한 이유는 다음의 세가지이다. 풍력발전단지 내에서 가장 남쪽에 위치해서 측정이

Table 1 Specification of measured wind turbine

Location	Hangwon, Jeju, Korea
Manufacturer	VESTAS/Hyosung
Rated output	660 kW
Rated wind speed	13 m/s
Rotor diameter	47 m
Tower height	45 m
Operating wind speed	4~25 m/s
Rotor speed	28.5~32
Regulation	Opti slip/tip
Annual generation	2,388 MWh

용이할 뿐만 아니라 다른 풍력터빈의 소음에 따른 영향도 작게 받고 또한 기존 연구⁽⁶⁻⁸⁾를 통한 자료도 확보하고 있어서 비교의 용이성에도 기인한다.

대상 풍력터빈의 사양 중 소음원 분석과 관련하여 주목하여야 할 점은 출력과위제어를 위하여 풍속이 임계 값 이상이 되면 회전익의 피치각을 조절하여 양력을 줄이는 피치 제어를 사용한다는 점이다. 기존 연구결과에서 제시한 것처럼 피치제어를 사용하는 풍력터빈은 음향파위가 풍속과 선형관계를 보이지 않아서⁽⁶⁾ 풍속에 따라 음원 발생 메커니즘이 큰 변화를 보이지 않을 것으로 생각된다.

2.2 측정 방법

현장에서의 실험은 2008년 6월과 11월에 수행하였다. 음장가시화를 위한 실험장비로 신호 분석기 46-channel B&K Pulse 3560D와 B&K 7768, 7753, WA089으로 이루어진 빔-형성 시스템(beamforming system, 이하 BS)을 사용하였으며, 그 구성은 Fig. 1과 같다. 2008년 6월의 측정의 경우 IEC61400-11의 측정 기준에 따른 기준 위치에서 측정을 시도하였으며, 이후 11월 측정의 경우 풍력터빈의 허브센터와 어레이(array)중심에 대한 지면과의 각도인 α 가 약 46도를 이루는 지점으로부터 약 2m씩 그 간격을 줄이면서 측정을 실시하였다. 이와 같은 이유는 현지의 지형 여건 및 바람에 따라 변하는 허브의 회전에 의해 측정 위치가 제한되었기 때문이다.

측정 시스템은 근접장 음향 홀로그래피(near-field acoustic holography, 이하 NAH)의 향상된 알고리즘인 통계최적화 근접장 홀로그래피(statistical optimized NAH, 이하 SONAH)와 지연과 합(delay and

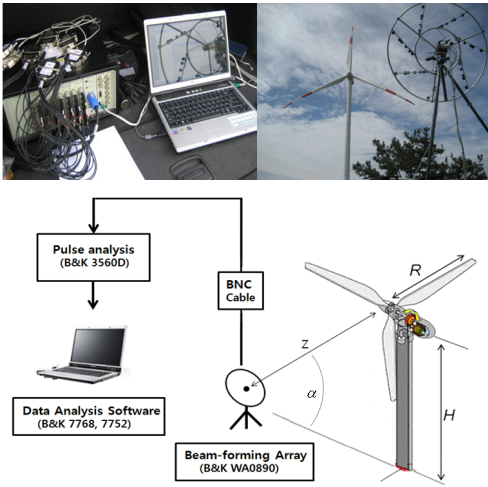


Fig. 1 The beam-forming system for noise source localization

sum, 이하 D&S)의 알고리즘을 적용하여 여러 빔들을 상호 조합하는 방식을 사용하고 있다. D&S의 경우 풍력터빈으로부터 방사되는 음향 신호로부터 음원 국부화를 실행하며, NAH는 BF어레이로의 돌풍등에 의한 원하지 않는 음에 대한 음향가시화 결과를 확인케 하여 국부화 결과의 신뢰도가 확보된다.

SONAH와 D&S 알고리즘을 사용한 측정해상도는 아래 식과 같이 표현할 수 있다⁹⁾.

$$R_{BF} \approx 1.22 \frac{Z}{D} \lambda, R_{NAH} \approx 0.5 \times \lambda \quad (1)$$

이때 Z 는 BF어레이 중심과 풍력터빈 중심과의 거리, D 는 어레이의 직경, λ 는 관심 주파수에 대한 파장, R 은 해상도를 의미한다. 해상도는 상관성이 없는 두 개의 동일한 크기 단극자 소음원을 소음지도에서 분리 할 수 있는 수치를 나타낸다.

해당 풍력터빈의 경우 동일한 크기의 1 kHz 음원을 분별하기 위한 임계 거리는 $R_{BF} \approx 17 \text{ m}$, $R_{NAH} \approx 0.017 \text{ m}$ 로 나타났다. 또한 측정 가능 주파수 범위는 500 Hz ~ 20 kHz이며, 이 측정에선 음장 가시화를 위한 신호 처리 시간을 고려하여 500 Hz ~ 3 kHz 범위에서 소음원을 측정하였다.

3. 측정 결과

3.1 IEC61400-11 규정에 따른 측정

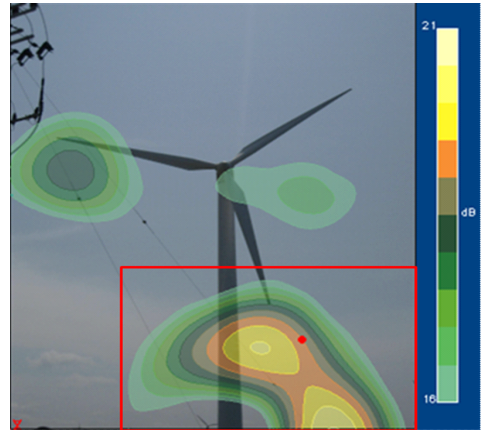


Fig. 2 The visualized noise sources in the rotor plane using the beam-forming techniques (IEC61400-11, $R_0 = 68.7 \text{ m}$)

2008년 6월에 수행한 측정은 IEC61400-11 규정에 따른 기준 측정위치에서 마이크로폰 어레이 측정장비를 위치시키고 수행하였다¹⁰⁾.

$$R_0 = H + \frac{D_w}{2} = 68.7 \text{ (m)} \quad (2)$$

이때, R_0 는 타워와 측정 위치간 거리, H 는 타워높이, D_w 는 풍력터빈 회전익의 회전 직경을 나타낸다. 측정은 총 10회 실행하였으며 대표적인 측정 결과는 Fig. 2와 같다. 로터 회전면상에서의 음장가시화 결과에서 지상으로부터 반사음이 전체 소음지도에 크게 반영 된 것을 확인 할 수 있다. 이로서 현재 측정장비인 BS를 이용한 음장가시화 시 지상으로부터의 반사음 영향에 의해 현재의 IEC61400-11의 규정에 따른 측정 위치는 적합하지 않은 것으로 판단되었다.

3.2 IEC 규정 대비 근접 거리 측정 결과

2008년 11월에 수행한 현장 실험에서는 지상 반사음의 영향을 줄이고자 측정 거리를 IEC 61400-11 규정 거리보다 25 m($\alpha=46^\circ$) 더 줄여 측정을 시행 하였다. 측정은 총 16회 하였으며, 그 대표적인 결과는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 3은 512 Hz ~ 3.01 kHz 사이의 영역에 대한 소음지도로서 회전익이 지면으로 향할 때 수음지점에 가장 크게 기여함을 알 수 있었으며, 회전익의 길이방향으로 50% 이상 지점에서 가장 기여도가 큰 소음원이

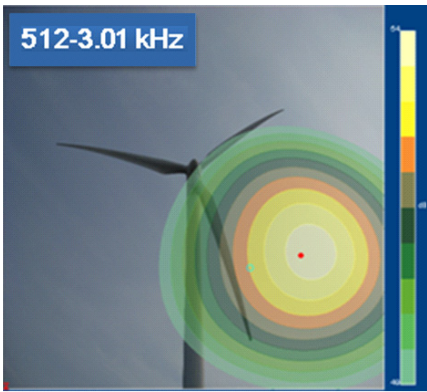


Fig. 3 The localized noise source about the overall frequency band, 512 Hz to 3.01 kHz($\alpha=46^\circ$)



Fig. 4 The localized noise source about the function of band frequency($\alpha=46^\circ$)

위치함을 알 수 있다.

주파수 밴드 별 소음지도의 결과는 Fig. 4와 같다. 이 결과에서 주목할 점은 주파수 밴드가 고주파로 증가함에 따라 소음원이 회전익의 길이방향으로 이동함을 알 수 있으며 이는 reference point(Fig. 4의 제일 왼쪽 그림에 표시)에 대한 소음지도의 상대 위치를 통하여 파악 할 수 있다.

이러한 특성은 다음절에서 기술 할 TBL-TE 소음원의 특징으로 회전익 끝으로 갈수록 에어포일의 코드(chord) 길이가 짧아지고 에어포일에 대한 상대적 유속이 증가하여 TBL-TE소음원의 고주파수 성분이 저주파 성분에 비해 상대적으로 크기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 이러한 결과는 S. Oerlemans의 연구 결과와도 일치한다⁽¹⁾.

다음절에서 BF를 이용한 음장가시화 결과의 분석을 위하여 풍력터빈 방사소음에 관련한 준경험식을 이용하여 이론적 음장가시화를 시도하였다.

4. 수음지점에 대한 최대 음압 방사위치 파악을 위한 이론적 검증

풍력터빈의 공력소음원은 유입 유동내의 난류와 에어포일이 상호 작용하여 생성되는 난류 유입 유동 소음과 난류가 없는 유입 유동과 에어포일이 상호 작용하여 생성되는 에어포일 자가 소음으로 대별할 수 있다. 난류 유입 유동은 대기 중의 난류가 회전익과 상호 작용을 하여 생성되는 대기난류-로터 상호작용(atmospheric turbulence / rotor interaction, 이하 ATRI) 소음과 풍력터빈 타워로부터 생성된 후류와 회전익의 상호 작용(tower wake / blade interaction, 이하 TWBI)에 의한 소음으로 나뉜다. TWBI의 경우 근래에 대부분의 풍력터빈에서 채택하고 있는 upwind 방식의 풍력터빈의 경우 그 영향이 적다⁽¹¹⁾.

에어포일 자가 소음은 다섯 가지 주요한 세부 발생원리에 의해 나뉘어진다⁽¹²⁾. 이 세부 소음원 중 에어포일 경계층 내에 생성된 난류와 날개 끝단(TBL-TE) 상호작용으로 에어포일 끝에서 방사되는 소음이 유력한 풍력터빈 공력소음원이다.

ATRI와 TBL-TE는 주요한 풍력터빈 광대역소음원으로 알려져 있으나 각 연구마다 그 기여도에 대한 의견은 다르다⁽²⁻⁴⁾. 따라서 이 연구에서는 두 가지 소음원 모두 사용하여 이론적 음장 가시화를 시도하였다.

4.1 대기입사난류-로터 상호작용 소음

ATRI의 경우 소음원의 방향성에 대한 정보를 파악하기 힘들므로 음원을 회전익상에 방향성을 고려하지 않은 이중극 소음원으로 존재 한다고 가정 한 후 풍력터빈 거동 조건에 따른 지상 수음점에 대한 기여도를 파악해 보았다. 이때 수음점(BF array)과 음원에 대한 좌표계는 Fig. 5와 같다.

수음점에서의 상대 압력은 아래 식과 같이 표현할 수 있다.

$$p'(x, t) = \frac{Q(\tau^*)}{4\pi r_i |1 - M_{ri}|} \quad (3)$$

여기서, M_{ri} 는 회전익의 각 위치에서의 수음점에 대한 마하수이고, r_i 는 음원과 수음점간의 거리이다. 또한 $Q(\tau^*)$ 는 난류 유입 유동 소음에 의한 수음점에서의 상대 음압강도가 유속의 6승에 비례함을⁽¹³⁾ 고려한 이중극 소음원의 강도로서 다음 식과 같다.

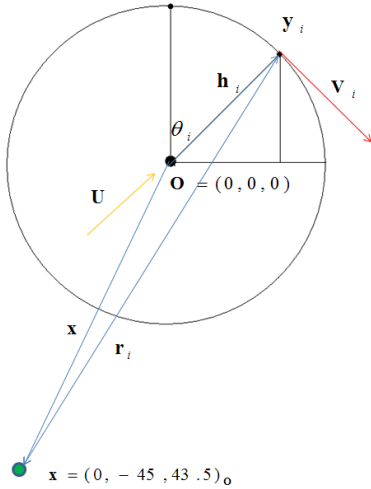


Fig. 5 Relative coordinate between rotor plane and observer point

$$Q(\tau^*) \propto M_i^6 \quad (4)$$

여기서,

$$M_i = \left| \frac{\mathbf{V}_i + \mathbf{U}}{c} \right| \quad (5)$$

또한 회전의 형상에 대한 정확한 정보의 부족으로 음원이 회전의 끝을 따라 회전한다고 가정하였다. 이로서 로터면상의 각 위치에서의 M_{ri} 은 아래 식처럼 표현할 수 있다.

$$M_{ri} = \left| \frac{\mathbf{V}_{ri}}{c} \right| \quad (6)$$

여기서,

$$\mathbf{V}_{ri} = \frac{\mathbf{r}_i \cdot (\mathbf{V}_i + \mathbf{U})}{|\mathbf{r}_i|^2} \mathbf{r}_i, \quad (7)$$

유입 유속 \mathbf{U} 의 경우 IEC61400-11의 고도에 따른 풍속식을 이용하여 계산하였으며, 지상으로부터 높이 h 에 따른 유입 풍속식은 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

$$V_s = U_h \left[\frac{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_{0ref}}\right) \ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H}{z_{0ref}}\right) \ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \right] \quad (8)$$

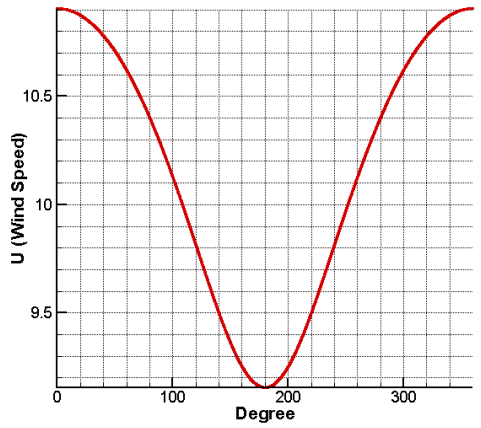


Fig. 6 Inflow speed according rotational angle

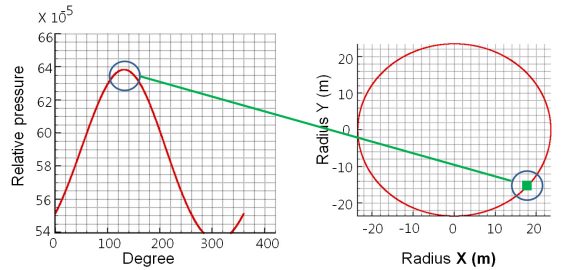


Fig. 7 Theoretical assessment of the relative contribution of the ATRI noise source

식 (8)을 이용한 로터 회전각 θ 에 따른 풍속 값은 Fig. 6과 같다.

식 (4), (6), (8)로부터 계산한 값을 식 (3)에 대입하여 주어진 수음위치에 대한 최대 음압 발생 회전 위치를 구하면 Fig. 7과 같다. BF 결과와 유사하게 우측하단에 최대 기여도 점이 위치한다는 것을 알 수 있다.

4.2 난류경계층-날개 끝단 상호작용 소음

TBL-TE 소음원의 방향성 함수를 고려한 음압섭동은 다음 식과 같다⁽¹²⁾.

$$p'(x,t) \propto \left(\frac{M_i^5 \bar{D}_i}{|\mathbf{r}_i|^2} \right)^{0.5} \quad (9)$$

여기서, \bar{D}_i 는 방향성 함수로 다음과 같이 저주파와 고주파에 따라 나뉜다.

$$\bar{D}_H(\Theta_e, \Phi_e) \approx \frac{2 \sin^2(0.5\Theta_e) \sin^2 \Phi_e}{(1 + M \cos \Theta_e)(1 + (M - Mc) \cos \Theta_e)^2}$$

$$\overline{D}_L(\Theta_e, \Phi_e) \approx \frac{\sin^2(\Theta_e) \sin^2 \Phi_e}{(1 + M \cos \Theta_e)^4} \quad (10)$$

Φ_e 와 Θ_e 는 Fig. 8의 좌표로부터 구해지는 수음위치에 대한 방향성 각도로서 다음 식으로부터 계산한다.

$$\Theta_e = \arccos\left(\frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{x}_e}{|\mathbf{r}| |\mathbf{x}_e|}\right), \quad \Phi_e = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{y}_e}{|\mathbf{r}_2| |\mathbf{y}_e|}\right) \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= \mathbf{x} - \mathbf{y}_i, \quad \mathbf{r}_2 = \mathbf{r} - (|\mathbf{r}| \cos \theta_e) \mathbf{x}_e \\ \mathbf{x}_e &= -\frac{\mathbf{V}}{|\mathbf{V}|} = -\frac{(V_i + U)}{|V_i + U|} \\ \mathbf{y}_e &= \frac{\mathbf{y}_i}{|\mathbf{y}_i|}, \quad \mathbf{z}_e = \frac{\mathbf{x}_e \times \mathbf{y}_e}{|\mathbf{x}_e \times \mathbf{y}_e|} \end{aligned} \quad (12)$$

이다.

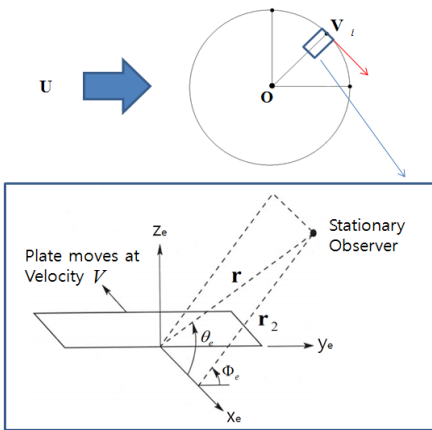


Fig. 8 The coordinate of directivity function about TBL-TE noise

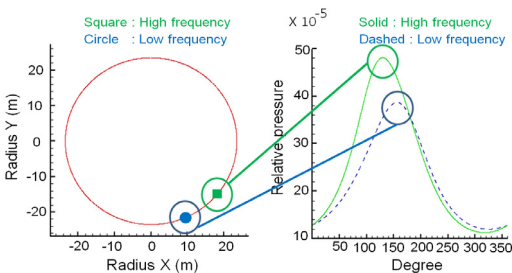


Fig. 9 Theoretical assessment of the relative contribution of the TBL-TE noise source

M_i 와 \mathbf{r}_i 를 ATRI경우 마찬가지로 구한 뒤 식 (10), (11)로부터 구한 각 위치에서의 방향성 함수 값을 식 (9)에 대입하여 계산한 최대 음압 발생 위치는 Fig. 9와 같다.

이론적 음장 가시화 결과인 Figs. 7과 9와 BF결과인 Figs. 3과 4와의 비교를 통하여 두 결과 모두 공통적으로 회전익이 지면으로 향하여 회전할 때 지상의 수음지점에 크게 기여함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

풍력터빈 로터면상의 주요 유동 소음원을 빔-형성기법을 이용하여 가시화 하였고 이론적인 음장가시화 결과와 비교하였다.

전 주파수 영역에 대한 음장가시화 결과로부터 회전익이 지상으로 향할 때 수음지점에 대하여 지배적인 영향을 끼치는 것을 확인 할 수 있었으며, 대기난류와 풍력터빈 회전익의 상호작용에 의한 유입 광대역소음과 에어포일 경계층 내 난류와 날개 끝단의 상호작용(TBL-TE)에 의한 에어포일 자가 광대역 소음에 대한 경험 예측식을 이용한 이론적 검증 결과와 정성적 일치를 확인하였다. 또한 실험적인 음장 가시화를 통하여 주요한 소음원이 회전익 반경의 50% 이상 지점에 위치하는 것을 파악할 수 있었다. 주파수 밴드별 분석 시 고주파수의 소음원이 회전익 길이방향으로 이동하는 양상을 관찰 할 수 있었으며, 이는 TBL-TE 소음원의 발생원리에 따른 것이라 생각된다. 따라서 피치각을 조절하여 출력을 제어하는 660 kW 풍력터빈의 방사소음에 대하여 TBL-TE 소음원이 주요한 소음원이라고 추정할 수 있다.

후 기

이 논문은 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업 (Eco-technopia 21 project)”과 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2008-331-D00083)을 받아 수행된 연구입니다.

참 고 문 헌

- (1) Oerlemans, S., et al., 2007, “Location and

Quantification of Noise Source on a Wind Turbine,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 299, pp. 869~883.

(2) Wagner, S., et al., 1996, *Wind Turbine Noise*, Springer, Berlin etc.

(3) Hubbard, H. H. and Shepherd, K. P., 1991, “Aeroacoustics of Large Wind Turbines,” *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, pp. 2495~2508.

(4) Lawson, M. V., 1994, “Theory and Experiment for Wind Turbine Noise,” *AIAA Paper*, 94-0117.

(5) Guidati, G., Ostertag, J. and Wagner, S., 2000, “Prediction and Reduction of Wind Turbine Noise: an Overview of Research Activities in Europe,” *AIAA Paper* 2000-0042.

(6) Cheong, C., Jung, S.-S., Shin, S.-H., Chun, S. J. and Choi, Y.-M., 2006, “Characteristics of Noise Emission from Wind Turbine According Methods of Power Regulation,” *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibrations Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 864~871.

(7) Lee, S., et al., 2007, “Low-frequency Noise Emission Characterization of Upwind-type Large Wind Turbines,” in the *Proceeding of Internoise*

2007, Istanbul, Turkey.

(8) Jung, S. S., Cheong, C. U., Shin, S.-H. and Cheung, W.-S., 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.

(9) Hald, J., 2005, “Combined NAH and Beam-forming Using the Same Array,” *B&K Technical review*.

(10) IEC 61400-11, 2002, “Wind Turbine generator System-part 11; Acoustic Noise Measurement Techniques,” *International Standard*.

(11) Zhu, W. J., 2004, “Modelling of Noise from Wind Turbines,” *Mechanical department, DTU*.

(12) Brooks, T. F., et al., 1989, “Airfoil Self-Noise and Prediction,” *NASA Reference Publication 1218*, National Aeronautics and Space Administration, USA.

(13) Oerlemans, S., Migliore, P., 2004, “Aero-acoustic Wind Tunnel Tests of Wind Turbine Airfoils,” *American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper* 2004-3042.