

파워 조절 방법에 따른 풍력 터빈의 방사 소음 특성

Characteristics of Noise Emission from Wind Turbine According to Methods of Power Regulation

정철웅* · 정성수† · 정완섭** · 신수현*** · 전세종** · 최용문**

Cheolung Cheong, Sung-Soo Jung, Wan-Sup Cheung, Su-Hyun Shin,
Sejong Chun and Yong-Moon Choi

(2006년 5월 1일 접수 ; 2006년 7월 19일 심사완료)

Key Words : Wind Turbine(풍력터빈), Sound Power Level(음향 파워 레벨), Wind Speed Dependence(풍속 의존성), Stall Control(실속 제어), Pitch Control(피치 제어)

ABSTRACT

In the development of electricity generating wind turbines for wind farm application, only two types have survived as the methods of power regulation; stall regulation and full span pitch control. The main purpose of this paper is to experimentally identify the characteristics of noise emission of wind turbines according to the power regulation types. The sound measurement procedures of IEC 61400-11 are applied to field test and evaluation of noise emission from each of 1.5 MW and 660 kW wind turbines (WT) utilizing the stall regulation and the pitch control for the power regulation, respectively. Apparent sound power level, wind speed dependence, third-octave band levels and tonality are evaluated for both of WTs. It is observed that equivalent continuous sound pressure levels (ECSPL) of the stall control type of WT continue to increase with increasing wind speed whereas those of the pitch control type of WT show less correlation with wind speed. These observed characteristics are believed to be due to the different airflow patterns around the blade between the stall regulation and the pitch control types of WT; the airflow on the suction side of blade in the stall types of WT are separated at the high wind speed. It is also found that the 1.5 MW WT using the stall control emits lower sound power than 660 kW one using the pitch control at wind speeds below 8 m/s, whereas sound power of the former becomes higher than that of the latter in the wind speed over 8 m/s. This wind-speed dependence of sound power leads to the very different noise emission characteristics of WTs depending on the seasons because the average wind speed in summer is lower than 8 m/s whereas that in winter is higher. Based on these experimental observations, it is proposed that, in view of environmental noise regulation, the developer of wind farm should give enough considerations to the choice of power regulation of their WTG based on the weather conditions of potential wind farm locations.

1. 서 론

† 책임저자; 정회원, 한국표준과학연구원

E-mail : jss@kriss.re.kr

Tel : (042) 868-5307, Fax : (042) 868-5643

* 정회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부

** 정회원, 한국표준과학연구원 물리표준부 역학그룹

*** 정회원, 울산 자동차부품혁신센터

최근 화석연료 가격의 급등과 청정한 환경에 대한 요구로 대체에너지에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 정부도 이에 풍력, 태양열, 연료전지 등과 같은 신재생에너지의 연구 개발을 국가적 차원에서 체계적으로 지원하기 위하여 노력하고 있다⁽¹⁾. 신재생

에너지 중 바람의 힘을 이용한 풍력 발전은 비교적 빠른 시일 내에 실용화 가능한 청정 신재생에너지라는 점에서 더욱 많은 관심을 받고 있다. 하지만 이런 청정 신재생에너지인 풍력발전도 소음이라는 환경오염원을 가지고 있다. 국내는 아직 유럽만큼 풍력발전기 소음에 대한 민원이 발생하지 않고 있으나 미래에 풍력 발전의 광범한 보급을 위하여 꼭 해결해야 할 사항이 환경소음문제로 여겨진다.

이 논문에서는 이러한 환경소음문제에 대비하기 위하여 풍력터빈(wind turbine)이 생산하는 전기의 파워 조절을 위하여 사용하는 대표적인 방법인 실속(stall) 제어와 피치(pitch) 제어에 따른 풍력터빈 방사소음의 특성을 실험적으로 규명하였다. 이러한 실험적 결과를 바탕으로 향후 국내에서 풍력 발전 단지를 개발할 때 환경 소음 규제와 관련하여 풍력 터빈 발전기를 선정 또는 개발하는데 기본 정보를 제공하고자 하는 것이 이 연구의 주요 목적이다. 실속 제어는 풍속의 증가에 따라 블레이드 받음각(angle of attack)이 커지고 이에 따라 에어포일 윗면에서 유동이 분리되어 발생하는 실속을 이용하여 양력을 감소시킴으로서 출력 파워를 제어하는 방법이고 피치 제어는 풍속 증가함에 따라 블레이드 받음각을 줄여 양력을 감소시킴으로서 출력 파워를 조절한다. 블레이드 하중 측면에서는 양력을 감소시킨다는 같은 결과를 나타내나 그 조절 기저의 근본적인 차이로 인하여 완전히 다른 성질의 공력 소음원을 제공하게 된다. 이론적으로 실속 제어를 사용하는 풍력 터빈은 풍속이 증가함에 따라 블레이드 주변의 실속류들이 커져서 풍속의 증가에 따라 지속적으로 커지는 소음 레벨을 발생시키는 것으로 알려져 있다⁽²⁾. 이러한 파워 조절 방법에 따른 풍력터빈 방사소음의 특성을 규명하기 위하여 국내에서 운용되고 있는 상업용 풍력발전단지내의 풍력터빈 중 실속 제어와 피치 제어를 각각 사용하는 1.5 MW와 660 kW 풍력터빈의 방사 소음을 풍력발전기 소음 실증의 방법 및 절차를 규정하고 있는 국제 규격 IEC 61400-11⁽³⁾에 의거하여 실증하였다. 측정 자료에 기반 하여 겉보기 음향 파워 레벨, 풍속 의존성, 1/3-옥타브 밴드 레벨, 순음성 분석 결과를 파워 조절 방법과 관련하여 제시하였다.

2. 풍력발전기 제원 및 측정방법

2.1 풍력발전기 제원

풍력발전기 현장 소음 실증을 수행한 곳은 제주도 북제주군 한경면 용당리에서 남부발전이 운용하고 있는 풍력발전단지과 제주도 북제주군 구좌읍 행원리의 제주시에서 운용하고 있는 풍력발전단지로서 각각 1.5 MW와 660 kW 풍력터빈에 대해서 소음 실증을 수행하였다. 용당리에 위치한 풍력발전단지는 1.5 MW급의 풍력터빈 4기가 운용중에 있으며 그 중 3호기에 대해서 소음 측정을 수행하였고 Table 1에서 주요제원을 나타내었다. 행원리의 풍력단지내에서는 600 kW에서 750 kW급까지 총 15기의 풍력터빈을 운용하고 있는데 그 중 가장 남쪽에 위치한 660 kW WT에 대해서 소음 실증을 수행하였으며 주요 제원을 Table 2에서 나타내었다. 대상 풍력터빈의 정격발전용량이 다르다는 점 외에 용

Table 1 Specification of 1.5MW WT(manufacturer : NEG-Micon/STX)

Rated output	1.5 MW
Rated wind speed	15 m/s
Rotor diameter	72 m
Tower height	62 m
Operating wind speed	4~25 m/s
Rotor speed	17.3 rpm
Regulation	Active stall
Annual generation electricity	3,343 MWh (Vmean : 6.5m/s)

Table 2 Specification of 660 kW WT(manufacturer : Hyosung/VESTAS)

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 rpm
Regulation	Opti slip/tip
Annual generation electricity	2,388 MWh (Vmean : 8 m/s)

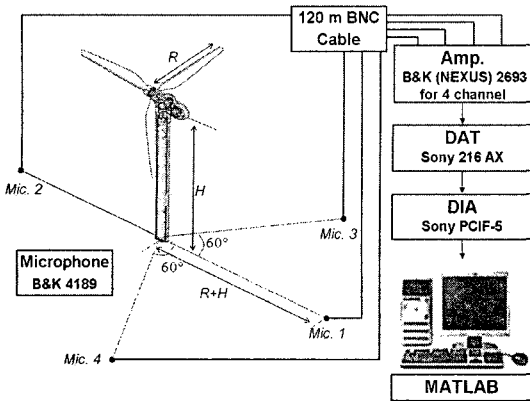


Fig. 1 Measurement locations and devices for acoustic quantities

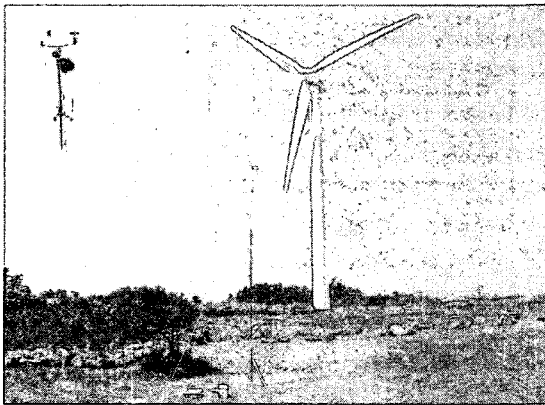


Fig. 2 Mobile meteorological mast at Hangwon

당리 풍력터빈은 실속제어를 행원리의 풍력터빈은 피치 제어를 사용하고 있다는 점이 주목해야 할 차이점이다.

2.2 측정 위치 및 장비

IEC61400-11 에서 요구하는 측정기기와 방법에 따라서 풍력터빈 방사소음을 평가하였다. Fig. 1에서 풍력터빈 소음 측정을 위한 마이크로폰 위치와 측정 및 분석 장비 구성도를 나타내었다.

IEC61400-11 의 규정에 따라 타워의 지면 중심에서 $R+H$ 떨어진 위치에서 Fig. 1에서 나타낸 네 위치에 마이크로폰을 설치하였다. 먼저 마이크로폰 신호를 증폭기를 통하여 DAT에 녹음시키고 DIA (digital interface adapter) 장비를 이용하여 컴퓨터에서 사용할 수 있는 이진자료로 변환한 다음 풍력터빈의 소음 분석을 위하여 개발한 MATLAB 프로

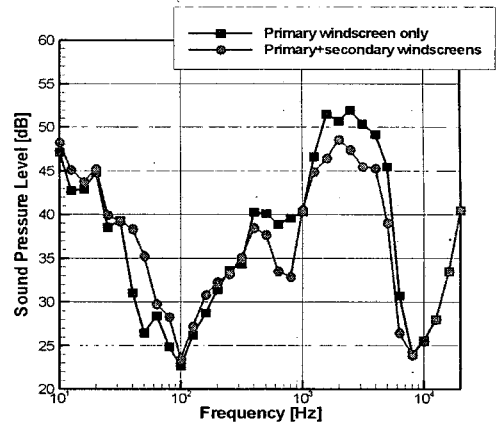


Fig. 3 Experimental result for the effects of wind screen

그램을 이용하여 측정자료를 분석하였다. 풍력터빈 소음 실증 과정에서는 소음에 영향을 주는 가장 큰 변수로 여겨지는 풍속도 소음과 동시에 측정해야 한다. 풍속측정을 위하여 이동식 기상타워와 기상 측정장비를 사용하였다. Fig. 2에서 측정 할 때의 기상 타워와 풍력발전기 사진을 나타냈다. 풍속을 비롯한 기상자료를 1초 간격으로 평균하여 기록하였으며 풍속은 지상 10 m 높이에서 측정하여 IEC61400-11 제시한 보정식을 사용하여 표준화하여 소음 측정 및 자료 분석 시 동기화 하였다.

IEC61400-11의 규정에는 바람에 의한 소음 측정 오염을 방지하기 위하여 방풍망을 사용하도록 규정하고 있는데 풍속이 10 m/s 이상일 때는 두 개의 방풍망을 사용하도록 요구하고 있다. Fig. 3에서 방풍망을 이용한 현장 측정결과를 보정하기 위하여 무향실에서 white noise를 이용하여 방풍망 효과를 가늠한 결과이다. 아래 결과를 이용하여 두 개의 방풍망을 사용하여 측정한 결과를 보정하였다.

3. 측정 결과

이 논문에서는 IEC61400-11에서 필수적으로 요구하고 있는 풍속과 소음레벨의 상관성, 겉보기 음향 파워 레벨, 1/3-옥타브 밴드 레벨, 순음성 분석을 실시하였다. 측정은 여름(8월말)과 겨울(12월 초)에 수행되었으며 아래에서 각각의 분석 결과를 제시하였다. 논문의 간략화를 위하여 여기서 언급하지 않은 측정 절차 및 분석 방법은 선행연구^(4,5)에

제시되어 있다.

3.1 풍속과 소음레벨의 상관성 및 겉보기 음향 파워 레벨

풍력터빈의 겉보기 음향파워레벨을 결정하기 위하여 8 ± 2.5 m/s 범위의 풍속에 대해 기준 위치(Mic. 1 위치)에서 1분 이상 동안 측정된 30개 혹은 그 이상의 자료들에 대해 등가연속음압레벨을 구하고 이차 회귀해석을 하여 각각의 정수값의 풍속에 대응하는 등가연속음압레벨을 $L_{Aeq,k}$ ($k=6, \dots, 10$ m/s의 정수 풍속값) 을 결정한다. 배경소음도 적어도 30개 이상의 자료를 이용하여 위와 같은 방법으로 추정한다. 각각의 정수값의 풍속에서의 $L_{Aeq,k}$ 값은 대응

하는 풍속에서의 배경소음에 대해 보정하고 $L_{Aeq,c,k}$ 로 서 나타낸다. 기준 위치와 정수의 풍속값에서 겉보기 음향파워레벨 $L_{WA,k}$ 은 배경소음에 대해서 보정한 $L_{Aeq,c,k}$ 를 사용하여 아래식으로 계산할 수 있다.

$$L_{WA,k} = L_{Aeq,c,k} - 6 + 10 \log_{10} \left[4\pi R_1^2 / S_0 \right] \quad (1)$$

여기서 R_1 은 회전자 중심에서 측정 위치까지의 거리이고 $S_0=1$ m²이다. Fig. 4에서 소음측정과 동시에 수행된 풍향풍속 측정 결과(1초 평균)를 도시하였다. 용당리에서는 여름의 경우 최소 2m/s에서 최대 8.5m/s의 동풍이 겨울의 경우 최소 3m/s 최대 14 m/s 정도의 서풍이 불었고 행원의 경우 여름에

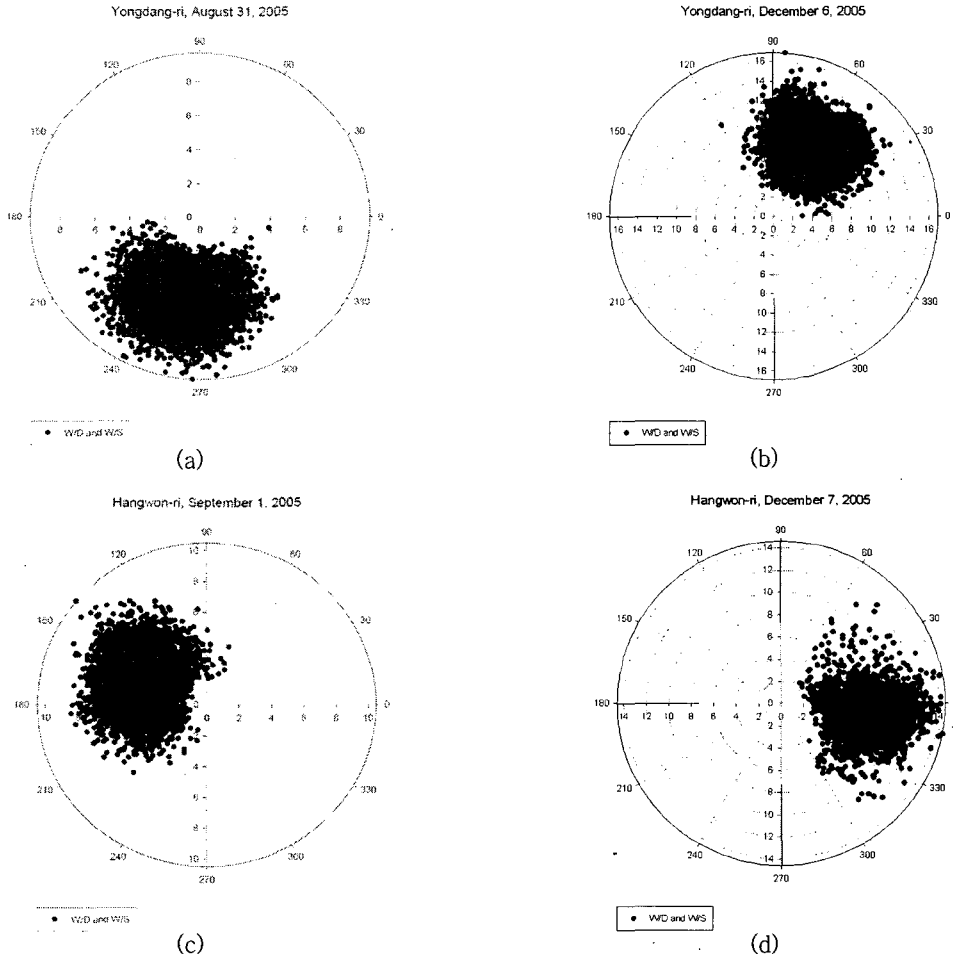


Fig. 4 Measured data of wind speed and direction (a) at Yongdang-ri in the summer, (b) at Yongdang-ri in the winter, (c) at Hangwon-ri in the summer and (d) at Hangwon-ri in the winter. (0° denotes the north direction)

는 최소 1.5 m/s에서 최대 8 m/s의 남풍이 겨울에는 최소 3 m/s 최대 14 m/s 정도의 북풍이 불었다는 것을 확인할 수 있다. 양쪽 지역 모두 여름에는 평균 5 m/s 정도의 풍속이 겨울에는 평균 9 m/s 정도의 풍속이 불었다. 뒤에서 제시하였지만 이런 평균 풍속의 큰 차이가 계절에 따른 풍력 터빈 소음 발생에 큰 차이를 야기하였다.

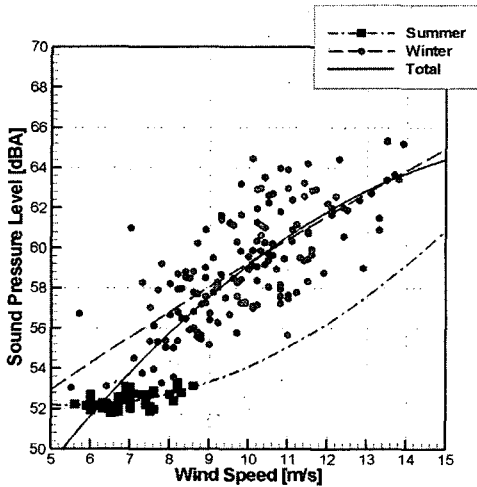


Fig. 5 Equivalent continuous sound pressure level of WT (1.5 MW) at Yongdang-ri (total regression curve: $34.8 + 3.4V - 0.092V^2$ where V denotes the wind speed)

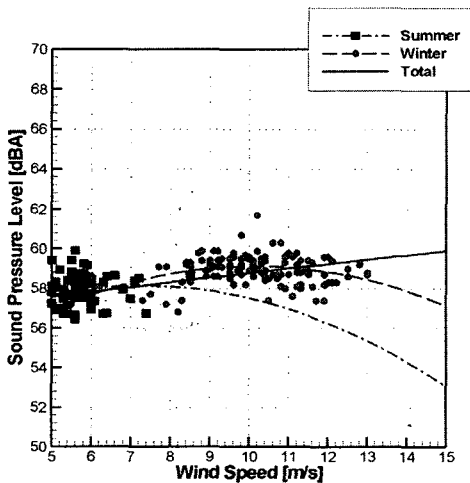


Fig. 6 Equivalent continuous sound pressure level of WT (660 kW) at Hangwon-ri (total regression curve: $56.3 + 0.26V - 0.0011V^2$ where V denotes the wind speed)

Figs. 5와 6에서 각각 용당리와 행원리에서 측정 한 자료를 사용하여 결정한 L_{Aeq} 값을 도시하였다.

용당리의 1.5 MW 풍력터빈의 경우 풍속이 5 m/s에서 14 m/s 범위에서 풍속이 증가함에 평균 1.5 dBs/m의 증가량을 보인 반면 행원리의 660 kW WT의 경우 0.2 dBs/m의 증가량을 나타내었다. 음압의 풍속상관성이 이처럼 완전히 다른 경향을 보이는 것은 두 풍력 터빈의 파워조절방법의 차이에 따른 것으로 풍속이 증가함에 따라 반응각이 증가하여 실속을 일으킴으로써 양력을 감소시키는 1.5 MW 풍력터빈의 경우 실속이 일어남에 따라 꾸준히 음향파워가 증가하지만 반대로 반응각을 감소시켜 양력을 감소시키는 피치 제어를 사용하는 660 kW 풍력터빈은 풍속에 대해 약한 상관성을 보이는 것으로 생각 된다.

하지만 Figs. 5와 6에서 여름에 측정한 자료만을 보면 오히려 실속 제어를 사용하는 1.5 MW 풍력터빈이 풍속에 따라 보다 작은 음압의 편차를 보인다. 이는 여름 측정 당시의 평균 풍속이 겨울에 비해 현저히 작아 대부분의 시간 동안 실속을 일으키지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 이런 실속이 일어나지 않는 상태에서는 1.5 MW 풍력터빈의 회전자의 회전속도가 고정되어 있기 때문에 풍속에 따라 회전속도가 변화는 660 kW 풍력터빈보다 풍속에 따른 음압의 편차가 작은 것으로 보인다⁽⁴⁾.

Table 3에서 Figs. 5와 6에서 도시한 음압 분포에 기반하여 결정한 겉보기 음향파워를 나타내었다. 풍속이 8 m/s 보다 작을 때는 행원의 660 kW 풍력터빈의 겉보기 음향파워레벨이 용당의 1.5 MW 풍력터빈보다 크지만 그 보다 풍속이 커질 때는 용당의 1.5 MW 풍력터빈의 음향파워가 더 커지게 된다는 것을 확인할 수 있다. 이런 음향파워의 풍속에 따른

Table 3 Apparent sound power level (dBA)

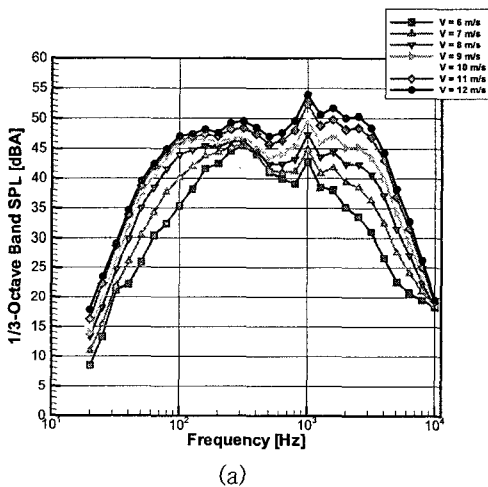
Wind speed (m/s)	1.5 MW (Yongdang)		660 kW (Hangwon)	
	L_{Aeq}	L_{WA}	L_{Aeq}	L_{WA}
6	51.6	97.9	57.8	101.1
7	53.8	100.0	58.0	101.3
8	55.7	102.0	58.3	101.5
9	57.5	103.8	58.5	101.8
10	59.1	105.4	58.8	102.0

특성도 앞에서 언급한 바와 같이 파워 제어 방법의 차이에 기인하는 것으로 보인다.

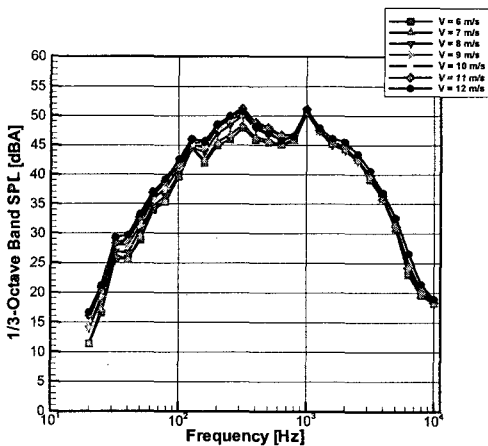
파워조절방법에 따른 소음 특성을 파악하기 위해 측정 당시 용당리와 행원리에서 실제 측정한 모든 풍

3.2 1/3-옥타브 밴드 레벨

기준 위치에서 풍력터빈의 방사 소음의 1/3-옥타브 밴드 스펙트럼은 각각의 정수값의 풍속에서 1분 이상 동안 측정된 적어도 3개 스펙트럼의 에너지 평균값으로 결정한다. 최소한 1/3-옥타브 밴드의 중심 주파수가 50 Hz에서 10 kHz까지의 범위를 포함하고 있어야 한다. 국제 규격에서는 6 m/s부터 10 m/s사이의 정수값 풍속에서만 1/3-옥타브 밴드 레벨을 제시할 것을 요구하고 있으나 이 논문에서는

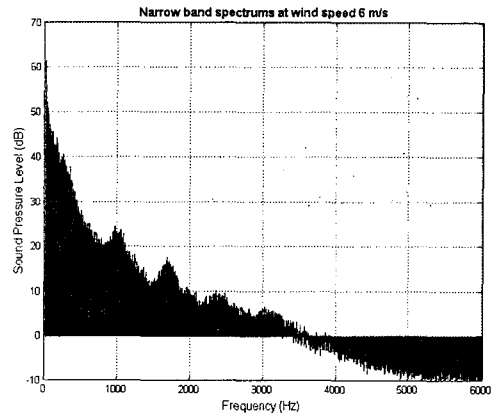


(a)

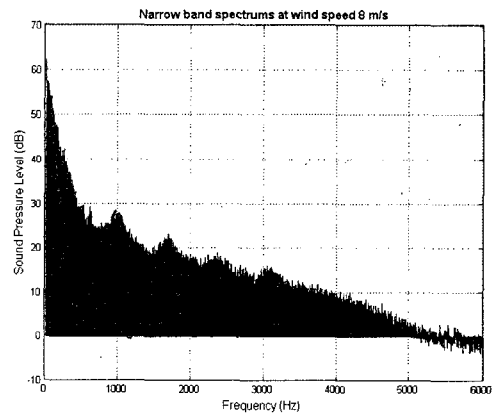


(b)

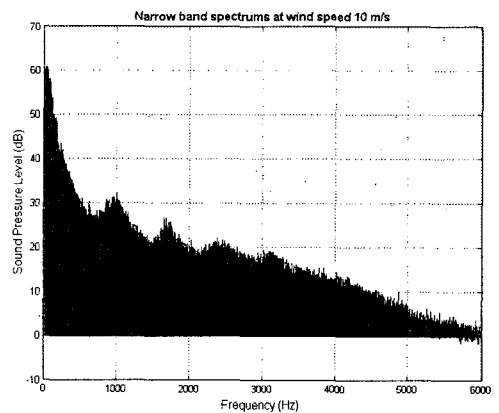
Fig. 7 Average one-third octave band levels of noise emission from (a) 1.5 MW WT at Yongdang and from (b) 660 kW WT at Hangwon



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Narrow band spectrums of wind turbines at Yongdang-ri according to the wind speeds: (a) 6 m/s, (b) 8 m/s and (c) 10 m/s

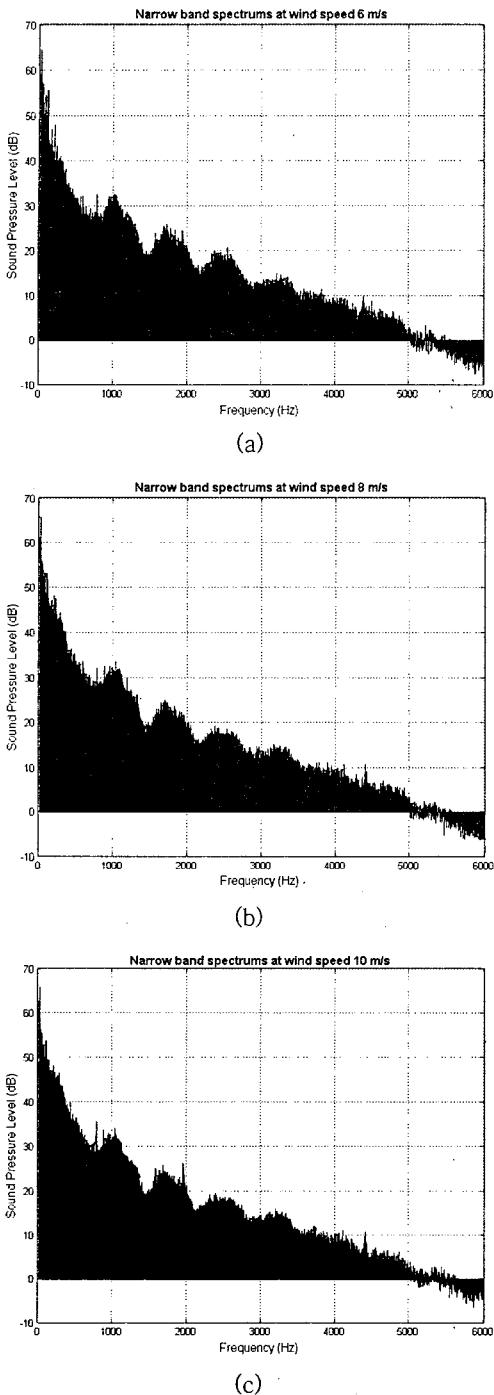


Fig. 9 Narrow band spectrums of wind turbines at Hangwon-ri according to the wind speeds: (a) 6 m/s, (b) 8 m/s and (c) 10 m/s

속 범위의 정수값 풍속에 대해서 1/3-옥타브 밴드 레벨을 계산하였으며 그 결과를 Fig. 7에서 도시하였

다. 실속제어를 사용하는 1.5 MW 풍력터빈의 경우 1 kHz 이상의 고주파 성분들이 풍속의 증가에 따라 꾸준히 증가하고 있는 반면에 피치제어를 사용하는 660 kW 풍력터빈의 경우 풍속에 따른 고주파 성분의 변화가 매우 작다는 것을 확인할 수 있다. 블레이드에서 실속이 일어났을 때 고주파 성분의 소음이 증가하는 것으로 알려져 있는데⁽²⁾ 이런 고주파 성분의 풍속에 따른 변화도 앞에서 기술한 파워제어방법에 따른 소음 특성을 잘 나타내고 있는 것으로 보인다.

3.3 순음성 분석

협대역 분석에 기초하여 소음의 순음성 여부를 결정한다. 각각의 정수값 풍속에 가장 가까운 2분 간의 측정자료를 사용하여 10초씩 12개 구간마다의 각각의 순음레벨(L_{pn}), 차폐음레벨(L_{pn})을 결정한 다음순음성(L_k)을 계산한다. Figs. 8과 9에서 각각 용당리와 행원리의 풍력 터빈의 협대역 스펙트럼을 나타내고 있다. 두 터빈 모두 잠재적인 순음성분을 나타내고 있지는 않은 것으로 판단되었다. 따라서 이 실험 데이터 상에서는 파워 조절방법의 차이가 순음성분의 발생과 특별한 관계를 가지지 않는 것으로 판단된다. 하지만 용당리 풍력터빈의 경우 행원리 풍력터빈과는 달리 풍속이 증가함에 따라 고주파 성분이 급격히 증가하고 있다는 것을 확인할 수 있다. 이는 1/3-옥타브 밴드 레벨에서 기술하였던 것처럼 실속제어를 사용하는 풍력터빈의 소음특성에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 결 론

파워 제어 방법에 따른 풍력 터빈의 방사 소음의 특성을 실험적으로 고찰하였다. 이론적으로 알려져 있는 바와 같이 파워 제어를 위하여 실속 제어를 사용하는 풍력 터빈의 음향 파워는 풍속의 증가와 함께 계속 증가한 반면에 피치 제어를 사용하는 풍력 터빈의 음향 파워는 풍속에 따른 상관성이 작았다. 그러나 실속 제어를 사용하는 풍력 터빈의 경우 블레이드의 실속을 일으키는 임계 속도보다 평균 풍속이 작은 여름에 풍력 터빈의 음향 파워가 겨울에 비해 현저히 작아지는 것을 확인하였다. 풍력 발전 단지를 건설하고자 하는 관계자들은 풍력 터빈을 선정할 때 여러 가지 요인을 고려하여야 하겠지만, 환경

소음측면에서만 국한하여 보았을 때 이 실험 결과를 참고할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 산업자원부의 제 2차 신재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획과 관련된 연구의 지원을 받아 수행하였습니다.

참 고 문 헌

(1) Korea Wind Energy Development Organization, www.kwedo.or.kr

(2) Brooks, T. F., et al., 1989, "Airfoil Self-noise and Prediction", NASA Reference Publication 1218.

(3) IEC 61400-11 Second Edition, 2002, Wind Turbine Generator Systems Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques, International Electrotechnical Commission.

(4) Cheong, C., Jung, S.-S., Cheung, W.-S., Shin, S.-H., Chun, S. and Lee, S.-H., 2005, "Field Test and Evaluation of Noise from Wind Turbine Generators at Yongdang and Hangwon in Jeju Island", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference. pp. 818 ~ 821.

(5) Kim, S. H. and Kim, T. H. 2006, "Noise Test and Evaluation of a 750kW Wind Turbine Generator", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibrations Engineering, Vol. 16, No. 2. pp. 124 ~ 131.