

# 파워 조절 방법에 따른 풍력 터빈 발전기의 방사 소음 특성

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

정성수\*\*·정완섭\*\*·신수현\*\*\*·전세종\*\*·최용문\*\*·정철웅\*  
Sung-Soo Jung, Wan-Sup Cheung, Su-Hyun Shin, Sejong Chun  
Yong-Moon Choi and Cheolung Cheong

**Key Words:** Wind Turbine Generator (풍력발전기), 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 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 turbine generators (WTG) utilizing the stall regulation and the pitch control for the power regulation, respectively. Apparent sound power level, wind speed dependence and third-octave band levels are evaluated for both of WTGs. It is found that while 1.5 MW WTG using the stall control is found to emit lower sound power than 660 kW one using the pitch control at low wind speed (below 8 m/s), sound power from the former becomes greater than that of the latter in the higher wind speed. Equivalent continuous sound pressure levels (ECSPL) of the stall control type of WTG vary more widely with wind speed than those of the pitch control type of WTG. These characteristics are believed to be strongly dependent on the basic difference of the airflow around the blade between the stall regulation and the pitch control types of WTG. These characteristics according to the methods of power regulation lead to the very different noise emission characteristics of WTG depending on the seasons because the average wind speed in summer is lower than the critical velocity over which the airflow on the suction side of blade in the stall types of WT are separated. These results propose 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. 서론

최근 화석 연료 가격의 급등과 청정한 환경에 대한 요구로 대체에너지에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 정부도 이에 풍력, 태양열, 연료전지 등과 같은 대체에너지의 연구 개발을 국가적 차원에서 체계적으로 지원하기 위하여 노력하고 있다<sup>(1)</sup>. 대체 에너지 중 바람의 힘을 이용한 풍력 발전은 비교적 빠른 시일 내에 실용화 가능한 청정 대체에너지라는 점에서 더욱 많은 관심을 받고 있다. 하지만 이런 청정 대체 에너지인 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. 본 논문에서는 국내에서 운용되고 있는 상업용 풍력발전단지내의 풍력발전기 소음을

풍력발전기 소음 실증의 방법 및 절차를 규정하고 있는 국제 규격 IEC 61400-11<sup>(2)</sup>에 의거하여 실증하였다. 생산하는 전기의 파워 조절을 위하여 사용하는 대표적인 두 방법인 실속 제어와 피치 제어를 각각 사용하는 1.5 MW와 660 kW 풍력터빈(이하 WT)에 대하여 현장 소음 실증을 수행함으로써 파워제어 방법에 따른 WT 방사소음의 특성을 실험적으로 규명하는 것이 본 논문의 초점이다. 실속 제어는 풍속의 증가에 따라 블레이드 받음각이 커지고 이에 따라 에어포일 윗면에서 유동의 분리되어 발생하는 실속을 이용하여 양력을 감소시킴으로서 출력 파워를 제어하는 방법이고 피치 제어는 풍속에 따라 블레이드 피치각 조절을 통하여 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 제어는 풍속이 증가함에 따라 발생하는 블레이드 주변의 실속류들에 의하여 보다 큰 소음을 발생시키는 것으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 측정 자료에 기반하여 겉보기 음향 파워 레벨, 풍속 의존성, 1/3-옥타브 밴드 레벨을 분석 결과를 파워 조절 방법과 연관

\* 책임저자: 정희원 부산대학교 기계설계공학과  
E-mail: ccheong@pusan.ac.kr  
Tel: (051) 510-2311, Fax: (051) 514-7640  
\*\* 정희원 한국표준과학연구원 물리표준부 역학그룹  
\*\*\* 정희원 울산 자동차부품혁신센터

하여 제시하였다. 파워 조절 방법에 따른 풍력 터빈 방사 소음의 특성을 실험적으로 파악하여 향후 국내에서 풍력 발전 단지를 개발할 때 환경 소음 규제와 관련하여 풍력 터빈 발전기를 선정 또는 개발하는데 기본 정보를 제공하고자 하는 것이 본 연구의 주요 목적이다.

## 2. 풍력발전기 제원 및 측정방법

### 2.1 풍력발전기 제원

풍력발전기 현장 소음 실증을 수행한 곳은 제주도 북제주군 한경면 용당리에서 남부발전이 운영하고 있는 풍력발전단지과 제주도 북제주군 구좌읍 행원리의 제주시에서 운영하고 있는 풍력발전단지로서 각각 1.5 MW WT와 660 kW WT에 대해서 소음 실증을 수행하였다. 용당리에 위치한 풍력발전단지는 1.5 MW 급의 WT 4기가 운용중에 있으며 그 중 3 호기에 대해서 소음 측정을 수행하였고 Table 1에서 주요 제원을 나타내었다. 행원리의 풍력단지내에서는 600 kW 에서 750 kW 급까지 총 15 기의 WT 을 운영하고 있는데 그 중 가장 남쪽에 위치한 660 kW WT 에 대해서 소음 실증을 수행하였으며 주요 제원을 Table 2에서 나타내었다.

Table 1. Specification of 1.5 MW WTG (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 WTG (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:6.5m/s)

대상 WT의 정격발전용량이 다르다는 점 외에 용당리 WT은 실속제어를 행원리의 WT은 피치 제어를 사용하고 있다는 점이 주목해야 할 차이점이다.

### 2.2 측정 위치 및 장비

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

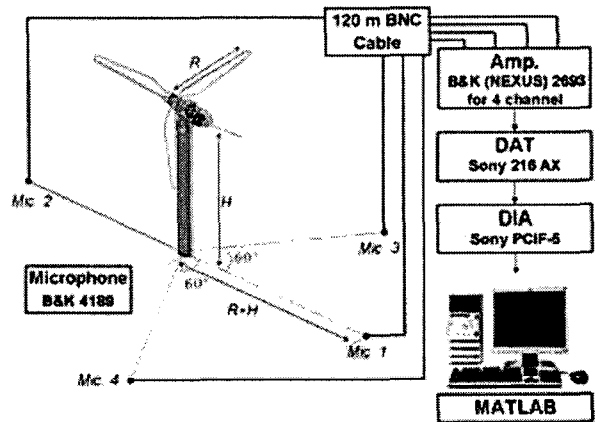


Fig. 1 Measurement locations and devices for acoustic quantities

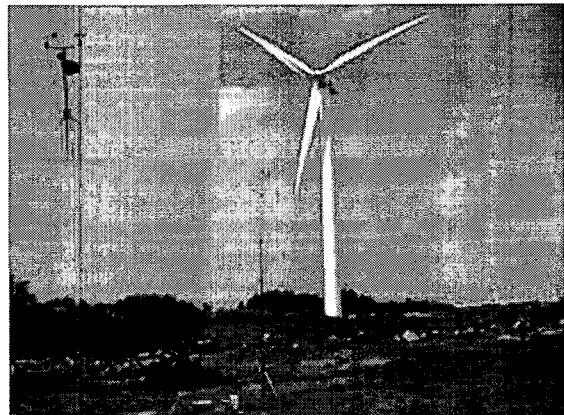


Fig. 2 Mobile meteorological mast at Hangwon

IEC61400-11의 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 WT의 소음 분석을 위하여 개발한 MATLAB 프로그램을 이용하여 측정자료를 분석하였다. WT소음 실증 과정에서는 소음에 영향을 주는 가장 큰 변수로 생각되는 풍속도 소음과 동시에 측정해

야 한다. 풍속측정을 위하여 이동식 기상타워와 기상 측정장비를 사용하였다. Fig. 2 에서 측정 할 때의 기상타워와 풍력발전기 사진을 나타냈다. 풍속을 비롯한 기상자료를 1 초 간격으로 평균하여 기록하였으며 소음 측정 및 자료 분석시 동기화 하였다.

IEC61400-11 의 규정에는 바람에 의한 소음 측정 오염을 방지하여 위하여 방풍망을 사용하도록 규정하고 있는데 풍속이 10 m/s 이상일 때는 두 개의 방풍망을 사용하도록 요구하고 있다. Fig. 2 에서 방풍망을 이용한 현장 측정결과를 보정하기 위하여 무향실에서 White Noise 를 이용하여 방풍망 효과를 가늠한 결과이다. 아래 결과를 이용하여 두 개의 방풍망을 사용하여 측정한 결과를 보정하였다.

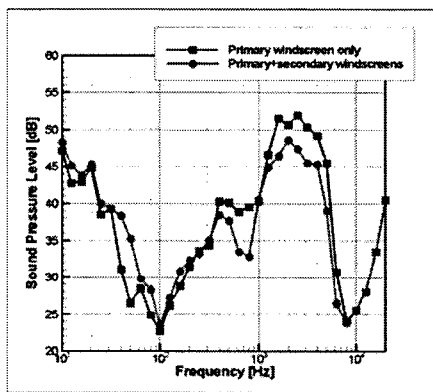


Fig. 2 Experimental result for the effects of wind screens

### 3. 측정 결과

본 논문에서는 IEC61400-11 에서 필수적으로 요구하고 있는 풍속과 소음레벨의 상관성, 겉보기 음향 파워 레벨, 1/3-옥타브 밴드 레벨 분석을 실시하였다. 측정은 여름(8 월말)과 겨울(12 월 초)에 수행되었으며 아래에서 각각의 분석 결과를 제시하였다.

#### 3.1 풍속과 소음레벨의 상관성 및 겉보기 음향 파워 레벨

WT의 겉보기 음향파워레벨을 결정하기 위하여  $8 \pm 2.5$  m/s 범위의 풍속에 대해 기준 위치(Mic. 1 위치)에서 1 분 이상 동안 측정된 30 개 혹은 그 이상의 자료들에 대해 등가연속음압레벨을 구하고 이차회귀해석을 하여 각각의 정수값의 풍속에 대응하는 등가연속음압레벨을  $L_{Aeq,k}$  ( $k=6, \dots, 10$  m/s의 정수 풍속값) 을 결정한다. 배경소음도 적어도

30 개 이상의 자료를 이용하여 위와 같은 방법으로 추정한다. 각각의 정수값의 풍속에서의  $L_{Aeq,k}$  값은 대응하는 풍속에서의 배경소음에 대해 보정하고  $L_{Aeq,c,k}$ 로서 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  $S_0 = 1 \text{ m}^2$ 이다. Fig. 3 에서 소음측정과 동시에 수행된 풍향·풍속 측정 결과(1 초 평균)를 도시하였다. 용당리에서는 여름의 경우 최소 2m/s 에서 최대 8.5 m/s 의 동풍이 겨울의 경우 최소 3m/s 최대 14 m/s 정도의 서풍이 불었고 행원의 경우 여름에는 최소 1.5 m/s 에서 최대 8 m/s 의 남풍이 겨울에는 최소 3m/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. 위에서 제시하였지만 이런 평균 풍속의 큰 차이가 계절에 따른 풍력 터빈 소음 발생에 큰 차이를 나타내었다.

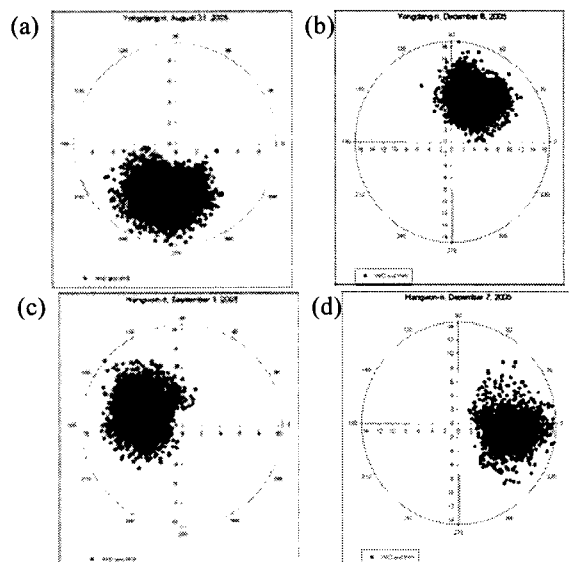


Fig. 3 Measured data of wind speed and direction (a) at Yongdang-ri in the summer, (b) at Yongdang-ri in the winter, (c) at Hangwon-ri in the summer and (d) at Hangwon-ri in the winter. (0 ° denotes the north direction.)

Figs. 4 과 5 에서 각각 용당리와 행원리에서 측정 한 값을 사용하여 결정한  $L_{Aeq}$  값을 도시하였다.

용당리의 1.5 MW WT의 경우 풍속이 5 m/s에서 15 m/s 범위에서 풍속이 증가함에 평균 1.5 dB·s/m의 증가량을 보인 반면 행원리의 660 kW WT의 경우 0.2 dB·s/m의 증가량을 나타내었다. 음압의 풍속상관성이 이처럼 완전히 다른 경향을 보이는 것은 두 풍력 터빈의 파워조절방법의 차이에 따른 것으로 풍속이 증가함에 따라 받음각이 증가하여 실속을 일으킴으로써 양력을 감소시키는 1.5 MW WT의 경우 실속이 일어남에 따라 꾸준히 음향파워가 증가하지만 반대로 받음각을 감소시켜 양력을 감소시키는 피치 제어를 사용하는 660 kW WT은 풍속에 대해 약한 상관성을 보이는 것으로 생각된다.

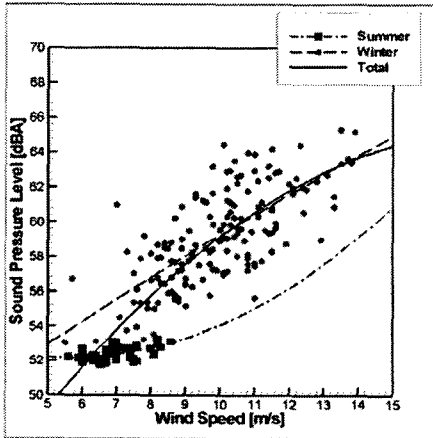


Fig. 4 Equivalent continuous sound pressure level of WTG (1.5 MW) at Yongdang-ri (Total Regression Curve:  $34.8 + 3.4V - 0.092V^2$ )

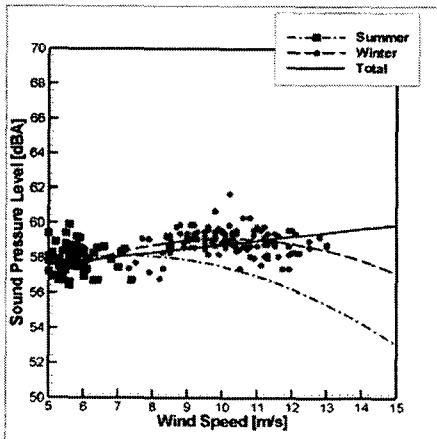


Fig. 5 Equivalent continuous sound pressure level of WTG (660 kW) at Hangwon-ri (Total Regression curve:  $56.3 + 0.26V - 0.0011V^2$ )

하지만 Figs. 4와 5에서 여름에 측정된 자료만을 보면 오히려 실속 제어를 사용하는 1.5 MW

WT이 풍속에 따라 보다 작은 음압의 편차를 보인다. 이는 여름 측정 당시의 평균 풍속이 겨울에 비해 현저히 작아 대부분의 시간동안 실속을 일으키지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 이런 실속이 일어나지 않는 상태에서는 1.5 MW WT의 회전자의 회전속도가 고정되어 있기 때문에 풍속에 따라 회전속도가 변화는 660 kW WT보다 풍속에 따른 음압의 편차가 작은 것으로 보인다<sup>(4)</sup>.

Table 3에서 Figs. 4와 5에서 도시한 음압 분포에 기반하여 결정된 겉보기 음향파워를 나타내었다. 풍속이 8 m/s 보다 작을 때는 행원의 660 kW WT의 겉보기 음향파워레벨이 용당의 1.5 MW WT보다 크지만 그 보다 풍속이 커질 때는 용당의 1.5 MW WT의 음향파워가 더 커지게 된다는 것을 확인할 수 있다. 이런 음향파워의 풍속에 따른 특성도 앞에서 언급한 바와 같이 파워 제어 방법의 차이에 기인하는 것으로 보인다.

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

### 3.2 1/3-옥타브 밴드 레벨

기준 위치에서 WT의 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 본 논문에서는 파워조절방법에 따른 소음 특성을 파악하기 위해 측정 당시 용당리와 행원리에서 실제 측정된 모든 풍속 범위의 정수값 풍속에 대해서 1/3-옥타브 밴드 레벨을 계산하였으며 그 결과를 Fig. 5에서 도시하였다. 실속제어를 사용하는 1.5 MW WT의 경우 1 kHz 이상의 고주파 성분들이 풍속의 증가에 따라 꾸준히 증가하고 있는 반면에 피치제어를 사용하는 660 kW WT의 경우 풍속에 따른 고주파 성분의 변화가 매우 작다는 것을 확인할 수 있다. 블레이드에서 실속이 일어났을 때 고주파 성분의 소음이 증가하는 것으로 알려져 있는데<sup>(4)</sup> 이

런 고주파 성분의 풍속에 따른 변화도 앞에서 기술한 파워제어방법에 따른 소음 특성을 잘 나타내고 있는 것으로 보인다.

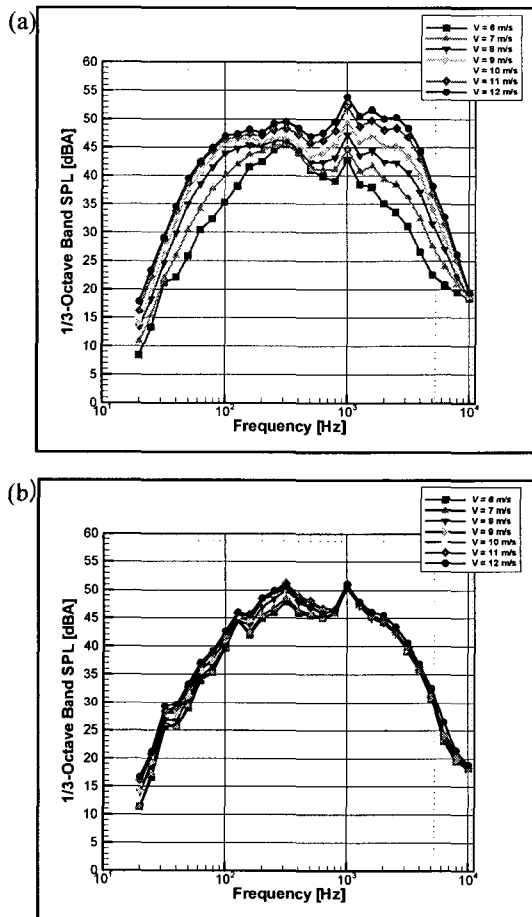


Fig. 5 Average one-third octave band levels of noise emission from (a) 1.5 MW WT at Yongdang and from (b) 660 kW WTG at Hangwon

#### 4. 결론

파워 제어 방법에 따른 풍력 터빈의 방사 소음의 특성을 실험적으로 조사하였다. 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 임계속도보다 평균 풍속이 작은 여름에 풍력 터빈의 음향 파워가 겨울에 비해 현저히 작아지는 것을 확인하였다. 이런 실험적인 결과에 기반하여 풍력 발전 단지를 건설하고자 하는 관계자들은 환경소

음측면에서 발전 단지 후보지의 기후에 따라 풍력 터빈의 파워제어방법의 선택에 있어서 주의하여야 할 것으로 생각된다. 만약 풍력 발전 후보지의 평균 풍속이 실속을 일으키는 풍속보다 작다면 적어도 환경소음측면에서는 실속제어를 사용하는 풍력 터빈의 사용도 무방할 것으로 사료된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) Korea Wind Energy Development Organization, www.kwedo.or.kr
- (2) IEC 61400-11 Second edition, 2002, Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques, International Electrotechnical Commission.
- (3) T.F. Brooks et al., "Airfoil Self-Noise and Prediction," NASA Reference Publication 1218, 1989.
- (4) C. Cheong, S.-S. Jung, W.-S. Cheung, S.-H. Shin, S. Chun, and S.-H. Lee, "Field Test and Evaluation of Noise from Wind Turbine Generators at Yongdang and Hangwon in Jeju Island," Fall Conference of KSNVE, 2005.