[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 2, 2003

공동주택에서의 소형풍력발전시스템 적용에 관한 연구

A Study on the Application of Small Wind Power System in Apartment Housing

박진철*, **경남호****
Park, Jin-Chul*, Kyung, Nam-Ho**

Key words : **풍력발전시스템**(Wind turbine system), **부지선정**(Micrositing analysis), **적용사례**(Case study), **건물적용**(Building application), **전생애 환경 비용**(Life cycle cost)

Abstract

This study aims to present the applicability of wind turbine generator system to urban buildings for the utilization of clean renewable energy. The results are as follows; According to the wind resource analysis, it has been found that small sized wind power system can be viable for buildings application due to the amplification of wind velocity around buildings or building clusters, in spite of low mean velocity of 2-3m/s in Seoul and Kyunggi urban areas. But planners must perform micrositing analysis around building so that wind turbine can be located at high velocity zones. The system must be designed to avoid obstacles preventing prevailing wind in buildings. It should be recognized that wind speeds are changing depending on the height and length from buildings. The wind power system can be used as a symbol of landmark which shows a sustainable architecture from the scenary itself. A case study for apartment building in urban showed that wind power systems can be applicable in two kinds of place, rooftops and ground levels. Especially, the wind power systems must be carefully positioned so that wind resources do not decrease when it is installed at ground levels. and according to life cycle cost analysis, adaption of new small wind power systems to buildings were proved to produce a profit if it is considered the expense of environment improvement and the wind speed increasing according to rise of building height.

This research will ultimately achieve green architecture that preserves nature and at the same time provides pleasant environment to humans, and will play a great role in establishing the environment-preserving sustainable architecture of the 21th century.

* 경민대학 건축과 부교수, 공학박사
** 한국에너지기술연구원, 책임연구원, 공학박사

* *Dept. of Architecture of Kyungmin College*
** *Korea Institute of Eneregy Reserach*

 E-mail ; jcpark@kyungmin.ac.kr

■ 기호설명 ■

V_x : 높이 x m로 보정된 풍속

V_a : 각 측후소에서 관측된 풍속

H_x : 보정높이인 x m

H_a : 각 측후소의 풍속 관측높이

$\overline{V}$: 평균풍속

V' : 변동율(perturbation from the mean)

σ^2 : 12 개월동안의 월평균풍속의 표준편차

ρ : 지역의 공기밀도(1.225kg/m³)

1. 서 론

최근 우리 사회는 지구에너지의 고갈 및 환경오염 등의 문제에 직면해 있다. 대체에너지 중 풍력에너지는 무공해, 무한정의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향이 거의 없어 청정에너지로서 각광을 받고 있어 유럽, 미국 등 선진국을 중심으로 전력을 생산하는 발전에너지로 널리 이용되고 있다. 대부분의 풍력발전은 바람의 자원이 풍부한 해안지대 등을 중심으로 대형화에 편중되어 있었지만, 최근에는 기기성능의 향상으로 도심건축물에 적용 가능한 소형 풍력발전시스템의 사용이 선진국을 중심으로 점차 증가하고 있는 추세이다.

따라서, 본 연구는 대체에너지이며 청정에너지인 풍력을 이용한 발전시스템을 공동주택에 적용시키고자 하는 것으로 다음과 같은 단계적 연구를 수행하였다. 즉, 먼저 풍력발전적용의 전제조건으로 건물 주변의 국지적 풍황과 풍력자원을 분석하였다. 그리고 풍력발전시스템을 공동주택에 적용하는데 있어 여러 장애요소들을 검토하였다. 또한, 공동주택에서 풍력발전의 사용 방안을 Case Study를 통하여 제안하였고 동시에 경제성도 검토하였다. 따라서, 이 연구의 목적은 궁극적으로 에너지절약 뿐만 아니라 지구환경오염으로부터 벗어난 쾌적하고 청정한 환경을 창출하고자 하였다.

2. 풍력발전시스템 특성

풍력 발전은 발전량에 비해 차지하는 면적 비율이 적어서 국토를 매우 효율적으로 이용할 수 있고 신재생 에너지 중 가장 저렴한 비용으로 전기를 얻는다는 장점 때문에 현재 전 세계적으로 가장 각광받는 에너지원 중 하나이다. 대형 풍력발전의 경우 발전 단가는 기존의 화석연료에 의한 다른 발전 방식에 비해서도 충분한 경쟁력을 가질 수 있을 정도이며 소형 풍력발전기의 발전 단가는 대형에 비해 약 2-3배가 되지만 설치 장소의 제한이 적고 대형을 설치할 수 없는 도서지역 등의 오지에는 경제적인 전력원이 될 수 있다.

2000년 12월말 현재 세계 45개 국가에 보급된 대형 풍력발전의 총 규모는 17,706MW로, 우리나라의 전체 발전설비규모(1999년) 51,587MW의 30%를 초과하고 있다. 특히 유럽국가들이 90년대 후반부터 원자력발전의 증설을 중지하면서부터 풍력발전기 이용보급은 비약적으로 성장하여, 연평균 30%가 넘는 성장률을 보이고 있다(그림 1. 참조).

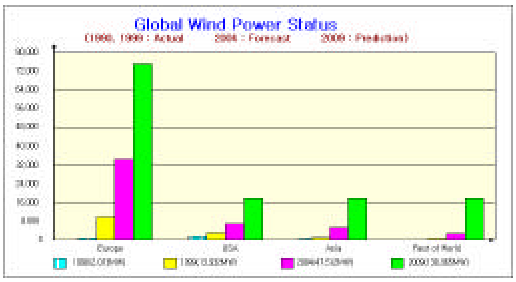


그림 1. 풍력발전기 세계 보급규모 및 전망

소형풍력발전 시스템은 주로 농촌, 도서 지역에 사용되어 왔지만 최근에는 저 풍속용 시스템을 도시지역에 적용하고자 하는 연구가 진행되고 있으

며 대형과는 별도의 시장을 가지고 있다.

풍력발전의 분류는 회전자 축의 방향에 따라 수직(Vertical) 및 수평(Horizontal), 운전형태에 의하여 계통연계(Grid-connected) 및 독립(Stand alone) 그리고 출력용량에 따라 소형(10kW급이하), 중형(10 - 600kW급) 및 대형(600kW 이상)으로 분류 할 수 있다.

3. 건축물 주위의 국지적 풍황 분석[1]

일반적으로 바람은 건물이나 산지 등의 장애물을 통과하는 과정에서 유동이 변형(distortion)되는데 일부에서는 바람의 에너지가 격감하며 또 일부에서는 바람의 에너지가 증폭된다. 특히, 건물 주위의 풍속 분포는 일정한 정형이 없는 건물의 모양과 크기의 함수이므로 해석자체를 어렵게 하고 있다.

특히, 건축물인 경우 건물에 따라 각 형태가 다르므로 일반 해석적으로 풍속 분포를 구할 수 있는 법칙은 찾기 어려워 현재로서의 최선의 방법은 풍동 실험과 수치해석을 병행하는 방법이다.

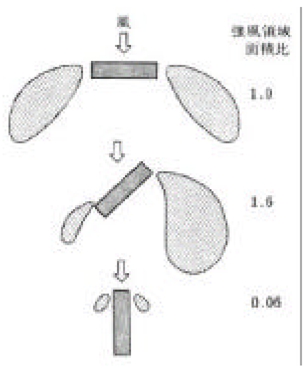


그림 2. 강풍영역 면적비

그림 2는 각도에 따른 강풍영역의 크기로 정면보다 경사 방향으로 바람이 불 때 바람의 편향으로 인하여 더욱 큰 강풍영역이 형성되고, 하단의 경우에는 강풍 영역은 큰폭으로 줄어드는 것을 보여 주고 있다.

가장 간단한 정육면체의 단독 건물에 정면으로 바람이 불어 올 경우, 건물의 모든 면에서 재순환 영역이 발생하는데 후면의 재순환 영역은 측면을 포함하여 크기가 가장 크고 전면에는 별도의 재순환 영역이 발생한다. 그리고, 건물의 높이가 높을수록 상부의 강한 풍속을 가진 유선은 하부로 강하 하여 건물의 측면에 강풍 영역을 형성한다.

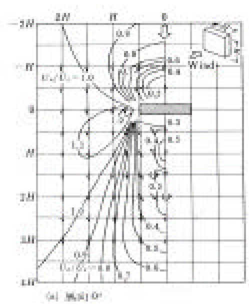


그림 3. 일반 건물에서 정면으로 바람이 불어 올 때의 풍속분포

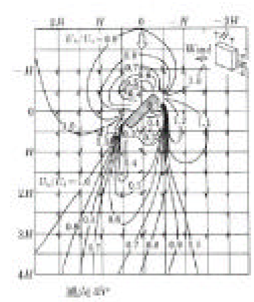


그림 4. 일반 건물에서 경사면으로 바람이 불어 올 때의 풍속분포

그림 3. 4, 5는 건물의 높이와 폭이 같은 건물 형태에 대해 바람의 방향에 따라서 건물 주변지역의 풍속분포를 풍동에서 모형 실험한 결과를 도

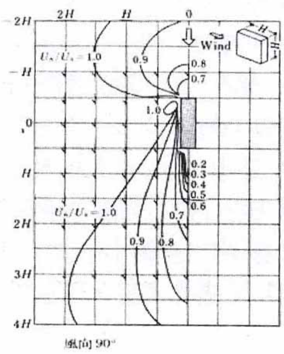


그림 5. 일반 건물에서 측면으로 바람이 불어올 때의 풍속분포

1) 木村建一 編. 建築環境學1, 2. 東京: 丸善株式會社, 1993.

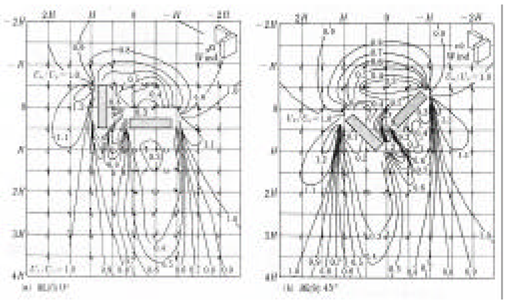


그림 6. L형 배치의 풍속 분포

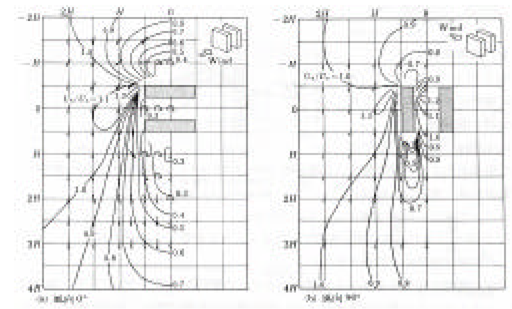


그림 7. 병렬 배치의 풍속분포

시한 것으로 그림 2와 마찬가지로 건물측면의 타원형 모양의 강풍지역이 발생하고 있었고 풍속 증가율은 건물이 없을 때에 비해 10%-20%(풍력에너지는 30%-70%)정도 상승되어 있다. 특히, 그림 4의 45도 경사각으로 바람이 불어 올 때로 건물 우측부에는 대단히 큰 강풍지역이 발생하며 20%이상 풍속이 증가하는 영역도 그림 2에 비해 대단히 크다. 반면에 좌측부분에는 강풍 지역이 감소하고 있다. 한편, 그림 5는 건물측면으로 불어오는 바람형태를 나타낸 것으로 유선형에 가까운 형태를 가지고 있어서 강풍지역을 발견하기 어렵다.

다음 그림 6과 7은 주거용 아파트의 형태에 따른 풍속분포를 나타낸 것이다. 즉, L형 배치의 경우 바람이 한 쪽 면에 정면으로 불어오면 강풍 지역은 건물의 좌, 우측 그리고 건물의 사이 부분으로서 10%이상 풍속이 빨라지고 있다. 그러나 바람이 경사각을 가지고 불어오는 경우에는 같은 지역이지만 강풍 지역은 현저하게 넓어진다. 한편, 건물이 병렬로 배치되고 정면으로 바람이 불어 올 경우 10%이상 풍속이 증가하는 건물 측면 지역은 L자형보다는 현저히 적어진다. 바람이 측면에서 불어 올 때에는 건물사이에 약간의 강풍지역을 발견할 수 있다.

4. 풍력자원분석

4.1 분석개요

풍력발전시스템을 적용하기 위해서는 지역별 풍속과 풍향 등의 풍력자원 분석이 먼저 필수적으로 수행되어야 하므로 본 연구에서는 서울지역을 포함하여 전국 측/관측소에서 측정된 풍속·풍향 자료를 수집 분석하였다.

그림 8은 우리나라의 내륙지역 바람분포를 나타낸 것으로 전체적으로 1m/s 내외의 풍속을 나타내고 있었으며 해안지역은 평균풍속 2m/s 이상으로 내륙지역보다는 양호한 풍력자원을 가지고 있는 것으로 나타났다. 또한, 우리나라는 지리적으로 대륙과 대양의 사이에 위치하고 있어 계절풍의 영향을 받고 있는데, 여름과 초 가을사이에 태풍이 불어오지만 이 기간동안 월평균풍속은 가장 작게 그러나 겨울과 초 봄에 이르기까지 가장 크게 나타나고 있었다.

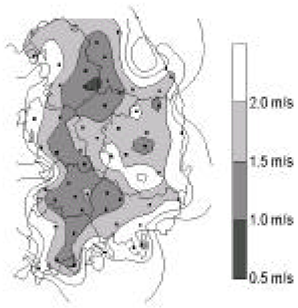


그림 8. 우리나라의 내륙지역 바람분포

4.2 전국 풍력자원 분포

풍력자원분포는 1991년부터 2001년까지 11년간 기상대 측후소의 풍속관측 데이타를 대상으

로 연간 평균풍속, 주풍향 및 풍력에너지 밀도 등에 대한 분석을 실시하였고 그 중에서도 특히 풍력자원량이 우수한 지역을 다음과 같이 정리하였다(표 1 참조).

표 1. 전국 풍력자원 분포

지 명	연평균풍속 (m/sec)	주풍향
서 울	2.2	WNW
인 천	4.2	NNW
강 릉	3.36	SW
대 전	2.23	ESE
군 산	4.7	WNW
부 산	4.6	SW
목 포	5.2	NNW
제주(고층)	8.8	NW

지역별로 보면 서울지역은 평균풍속 2.2m/s의 분포로 주풍향은 서풍(WNW, 풍속 2.5-4.5m/s)으로 나타났다. 그림 9는 서울지역의 주간(10시-22시), 야간(23시-9시)의 월별 평균풍속을 나타낸것으로 주간이 야간보다 1m/s이상 강한 풍속을 나타내고 있었다. 특히 겨울에서 봄철까지는 2.5m/s가 넘는 비교적 높은 풍속을 보이고 있었으나 8월부터 11월의 경우 2m/s를 넘지 않고 있었다.

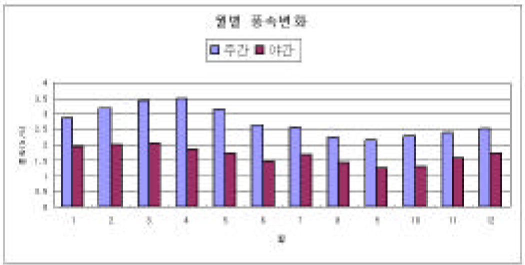


그림 9. 서울지역 월별풍속변화

한편, 경인지역은 인천, 강화, 동두천, 서울, 수원, 양평, 이천지역이 평균풍속 2-3m/s 내외를 나타내고 있었고 특히, 해안도시인 인천지역이 풍력자원이 가장 우수한 것으로 나타났다. 강원지역은 강릉이 평균 3m/s 이상의 평균풍속을 나타내고 있었고 속초, 춘천 2-3m/s, 원주가 평균 1.5-3m/s의 풍속을 나타내고 있었다. 충청지역은 내륙지역으로 대전, 청주, 충주지역이 1.7-3.5m/s의 풍속으로 다른 지역에 비해 상대적으로 낮은 풍속을 나타내고 있었다. 경상지역은 부산이 평균 4m/s 이상, 마산, 울산, 포항 등이 평균 3-4m/s로서 타지역에 비해 1-2m/s이상 풍속이 강하게 나타났으며 특히, 해안도시인 부산과 포항이 상대적으로 높은 풍속을 나타내고 있었다. 전라지역은 군산, 여수 등이 4-6m/s 그리고 전주가 2m/s 내외의 풍속으로 나타났다. 제주 해안의 강풍 지역은 30m 높이에서 5.5 - 7m/s 정도이며 15층 높이에서는 8 m/s 내외로 추정되어 국내에서 가장 우수한 풍력자원을 가지고 있는 것으로 나타났다.

5. 풍력발전시스템의 건물적용시 검토사항

풍력발전을 건물에 적용하는데 가장 중요한 풍력자원의 특성뿐만 아니라 기상조건, 지형조건 및 물리적조건 등 다음의 사항들을 고려해야 한다.

(1) 대상지역의 풍향, 풍속조건을 기상청자료, 경험자료 및 실측자료를 함께 고려해야 한다.
(2) 건물의 주동 배치 형태에 따른 바람의 패턴을 고려한다.
(3) 지형상 돌풍 또는 난류발생 지역과 낙뢰발생지역은 회피하고 주변에 큰 산이나 건물 및 장애물 등이 없도록 해야한다.
(4) 가급적 해발고도가 높지않은 지역을 선정하되 지형상 바람을 모을 수 있는 주풍향 위치가 적합하다.
(5) 기초공사용 자재의 반입과 발전설비 설치용 장비의 도입이 가능한 장소이어야 한다.
(6) 소음 및 경관영향 평가에 부응하여야 한다.

5.1 건물의 주동배치형태에 따른 풍향분석

풍력발전시스템의 건물 설치방식은 크게 옥상설치와 단지 외부공간설치로 두 가지로 분류할 수

있는데 옥상에 설치시에는 풍속이 층수가 높아질수록 상승되는 바람의 지수법칙을 적용시킬 수 있지만 단지외부공간에는 다음과 같은 풍속의 변화를 고려해야 한다. 즉, 주동의 배치형태를 일렬배치, L 형배치, 평행배치, ㄷ배치 등으로 분류하여 각 배치형태에 따른 풍력발전의 설치지역을 찾아야 할 것이다.

(1) 일렬배치시

일렬배치시는 전면에서 바람이 불어오는 경우 측면부에 1.2배로 풍속이 상승하는 구역이 발생하며 이 구역에 풍력발전시스템의 적용이 가능하다. 건물후면부의 경우 0.3-0.4배로 유입풍속에 비해 풍속이 현격히 저하되므로 풍력발전시스템의 설치가 불가능하다.

(2) 평행배치시

건물의 평행배치시 바람의 유입방향에 따른 풍속분포는 건물측면 까지는 바람의 유입속도의 1.2배까지 풍속이 상승하고 건물후면부의 경우 0.5배이하로 저하되므로 이 지역의 설치는 불가능할것으로 분석되었다.

(3) L 형배치시

L형배치는 직각배치형태로서 바람이 전면으로 유입되는 경우와 45°로 유입되는 경우로 나눌 수 있는데 전면으로 유입되는 경우 건물주변에서 유입속도의 1.1-1.2배의 풍속을 나타내어 설치가 능하지만 건물후면과 전면부, 건물과 건물사이부분은 풍속저하역으로 나타났다. 45°로 유입되는 경우 또한 건물말단부의 2H까지 1.2배로 풍속상승구역이 나타나고 있어 이 부분을 제외한 나머지부분은 설치가 불가능한 풍속저하역으로 분석되었다.

5.2 장애물

건물이나 나무 그밖의 구조물과 같은 장애물은 downstream 방향으로 바람을 감소시키고 주위에 turbulence를 일으키는데 turbulence는 물체의 앞쪽보다 뒤쪽에 현저히 나타나므로 풍력발전설치시 주풍향방향 앞쪽의 장애물은 피해야 한다. 특히 장애물에 의한 풍속의 감소는 그 높이와 길이에 따라 증가하므로 이에 대한 고려가 뒤따라야 할 것이다.

5.3 언덕 및 터널효과

일반적으로 풍력발전의 설치는 주변환경이 한눈에 내려다 보이는 언덕에 위치하는데 이는 주풍향방향에 대하여 넓게 보이는 이점 때문이다. 그러나, 바람이 언덕에 도달하게 되면 표면거칠기가 고르지 못하고 많은 turbulence가 발생하므로 언덕정상에 설치할 경우에는 이러한 점을 고려하여야한다. 한편, 큰산이나 빌딩사이의 바람은 공기가 압축되어 바람이 현저하게 증가한다. 예를들면, 6m/s인 바람인 경우 자연적인 터널효과에 의하여 9m/s바람을 얻을 수 있게 되어 이와 같은 위치에 풍력발전기를 설치하는 것이 보다 효과적이다.

5.4 소음 및 진동[2)]

풍력발전의 소음은 크게 공기역학적 소음과 기

2) 표 1. 공동주택단지내 소음기준 [단위 : dB(A)]

구 분	적용대상지역	환경기준dB(A)	
		낮(06:00-22:00)	밤(22:00-06:00)
도로변 지 역	'가'지역	65	55
	'나'지역	65	55
일 반 지 역	'가'지역	50	40
	'나'지역	55	45

- '가'지역: - 국토이용관리법 제 6조의 규정에 의한 자연환경보전지역, 관광휴양지역 및 취락 지역중주거지구
  -도시계획법시행령 제15조의 규정에 의한 전용주거지역
- '나'지역: - 도시계획법시행령 제 15의 규정에 의한 일반주거지역 및 준주거지역

계적소음으로 나눌수 있다. 공기역학적 소음은 바람이 블레이드를 통과하면서 발생한다. 보통 대형 풍력발전단지는 교외의 소음과 관계없는 지역에 위치하므로 큰 문제가 되지 않지만 거주영역과 가까운 곳에 위치한 소형풍력발전기의 소음은 검토의 대상이 되었다. 그러나, 최근 기술의 급격한 발달로 풍력발전기의 소음은 크게 감소하여 블레이드의 소음은 5dB 이하이고 현재 상용화되어있는 일반적인 소형풍력발전기는 약 53-55dB정도로 공동주택내 소음기준과 비슷한 수준을 나타내고 있어 주변지역에 큰 소음장해를 일으키지는 않는 것으로 나타났다.

5.5 하중[3)]

풍력발전시스템은 적재하중으로 분류될 수 있는데 기초면적 1㎡당 하중을 고려하여 시스템의 선정이 이루어져야 한다. 일반적으로 소형인 경우 약 20kW급인 경우 기초면적 7.5㎡, 2ton이며 266 ㎏/㎡으로 나타나 옥상플라자 설치시의 구조기준에도 크게 못 미치는 수준이었으며, 공동주택의 적재하중 산정시 가장 큰 하중부담을 갖는 냉각탑 1.5ton과도 비슷한 수준을 나타냄으로써 공동주택 옥상에 풍력발전을 적용시 기둥과 보 또는 슬라브의 보강 등은 필요치 않는 것으로 판단되었다.

5.6 전파장해

(Electro Magnetic Interference : EMI)

풍력발전기의 금속로터블레이드는 전파에 영향을 미쳐 주변의 전자기신호가 블레이드의 통과주파수에 장해를 일으킬수 있다. 그러나, 주로 대형 풍력발전기인 경우 대형의 블레이드로 인하여 전파장해를 초래할 수 있는데 소형인 경우, 최근 개발된 목재, 섬유유리(fiberglass)로 제작된 블레이드를 사용할 경우 전파장해 측면에서 문제가 없는 것으로 조사되었다.

5.7 경관

풍력발전기를 건물에 적용시 건물의 입면형상과 연계된 디자인전략이 필요하며 특히, 랜드마크적 역할도 할 수 있다. 최근, 풍력발전기는 그 형상만으로도 환경친화적인 이미지를 연상시켜 친환경주거단지로서의 성격부여에 큰 역할을 할수 있을 것으로 기대된다. 또한, 건물내 거주자 및 어린이들에게 환경친화에 관한 교육 및 홍보 등의 효과를 발휘할 수 있다.

6. Case Study

본 연구에서는 풍력발전시스템을 건축물에 적용시키기 위하여 여러 건물 중 공동주택단지를 선정하여 Case-study를 실시하였다. Case-study의 공동주택 단지는 풍력발전의 입지 조건이 비교적 양호한 경사지에 위치한 경기도 남양주시의 평내택지개발구역내으로 약 1000세대로 구성되는 17-20층형의 11개동을 선정하였다.

6.1 대지현황분석

최근 환경문제에 대한 관심이 고조됨에 따라 친

3) 현재 우리나라에서 지어지는 건축물의 옥상은 최소한 <각주 표2>와 같은 적재하중을 기준으로 설계되도록 되어있다.

표 2. 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙

사무실 · 학교 · 주거용 건축물	200㎏/㎡
옥상플라자 · 테라스 · 옥상정원	500㎏/㎡
적재물이 거의 없는 옥상	100㎏/㎡
30°이상 경사지붕 · 곡면지붕	80㎏/㎡
헬리콥터 정착장	500㎏/㎡

(출처 : 건설교통부령 제 53호 제 11조 1항 별표시)

환경설계적 접근방법이 중요한 요소로 적용된다. 본 공동주택은 주변의 자연경사지를 그대로 유지하여 남고북저로 배치함으로써 주풍향인 북서풍을 최대한 단지내로 도입하고 있는 상황이다(그림 10, 11참조) .

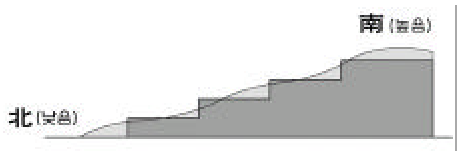


그림 10. 대지 형상도

그림 11. 단지내 주동 배치 형태

6.2 풍력자원분석

풍력발전시스템을 적용하기 위해서는 지역별 풍속과 풍향 등의 풍력자원분석이 필수적으로 수행되어야 하므로 본 연구에서는 1991년부터 2001년까지 11년간의 기상대 측후소의 풍속관측 데이타를 적용하였다.

(1) 풍속분석

표 2. 대상지역 월평균 풍속

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
풍속 m/s	3.08	3.33	3.52	3.46	3.14	2.63	2.74	2.36	2.21	2.31	2.57	2.73

표 2에서 알 수 있듯이 대상 공동주택의 월평균 풍속은 2.84m/s 크기로 특히, 1월부터 5월까지 평균 3.3m/s의 분포를 보이고 있었다. 이와 같은 값을 건물높이에 따라 상승하는 풍속의 보정법칙을 사용하여 계산하면 다음과 같다. 즉, 바람이 높이에 따라 그 속도가 달라지고 있음에 높은고도에서 보다 정확한 값을 얻기 위하여 가장 많이 사용되고 있는 power law의 (식 1)을 이용하였다.

$$V_x = V_a\left(\frac{H_x}{H_a}\right)^n \quad \text{(식 1)[4)]}$$

여기에서 n은 지표면의 형상에 따라 결정되는 지수로서 일반적으로 평원이나 해안에서는 0.1 0.14, 전원에서는 0.17-0.25, 시가지에서는 0.25-0.5의 값을 갖는다. 본 연구에서는 각 건물의 층고를 2.6m로 하였고 총 높이에 10m를 가산하여 계산하였고, n을 0.30로 입력하여 풍속데이타를 보정하였다.

따라서, 본 대상 공동 주택이 17층부터 20층까지 구성된 점을 고려하여 건물높이는 20층을 기준으로 산정한 풍속값은 그림 12와 같다.

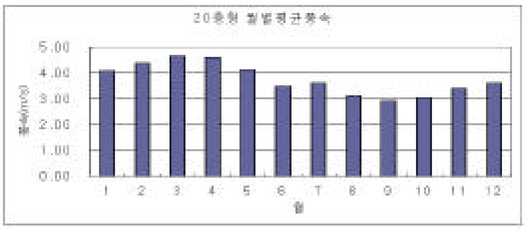


그림 12. 20층 건물높이에서의 월평균 풍속

그림 12는 20층 건물높이의 월별 평균풍속변화는 나타낸 것으로 9월을 제외한 모든 기간에 3m/s를 초과하고 있었으며 특히, 1월부터 5월까지 평균 4.4m/s 높은 풍속값을 나타내고 있음을 알 수 있었다.

(2) 풍력에너지밀도 분석결과

풍력에너지 밀도는 그 위치에서 풍력발전에 의

4) International standard IEC 61400-1

에 전환되어지는 에너지의 양을 나타내는 것이다. 또한, 지상 고도가 증가함에 따라 풍속도 증가하므로 풍력에너지 밀도 값은 풍속기상데이타를 이용하여 풍력에너지밀도를 추정하고자 평균풍속 $\overline{V}$와 변동율(perturbation from the mean) V'의 합계에 기초한 식을 사용하여 다음 (식2)와 같이 산정되었다.

$$P_a = \frac{1}{2}\rho(\overline{V}^3 + 3\overline{V}\sigma^2) \qquad (식\ 2)$$

여기서 실제 풍속 $V = \overline{V} + V'$로 표현되고 $V' = 3\overline{V}\sigma^2$ 이다.

표 3. 풍력에너지밀도

	최대 (m/s)	평균 (m/s)	표준편차	분산	변동율 (%)	풍력에너지 밀도(W/㎡)
1월	20.07	4.08	2.60	6.78	63.80	61.19
2월	17.15	4.41	2.77	7.65	62.73	74.94
3월	19.21	4.67	2.76	7.62	59.10	86.06
4월	22.29	4.59	2.91	8.45	63.33	83.77
5월	17.15	4.16	2.67	7.12	64.12	64.55
6월	15.95	3.48	2.31	5.33	66.31	40.64
7월	16.29	3.64	2.54	6.43	69.74	46.37
8월	20.07	3.13	2.26	5.12	72.26	31.86
9월	19.21	2.93	2.13	4.52	72.69	26.79
10월	15.78	3.07	2.33	5.44	76.06	30.80
11월	17.15	3.41	2.39	5.70	70.07	39.15
12월	17.66	3.62	2.45	6.02	67.80	45.31
평균		3.77				52.61

표 3은 20층 공동주택 높이에서 풍력에너지밀도 분석결과를 나타낸 것으로 평균 52.61W/㎡ 이상의 비교적 높은 분포도를 나타냈고 특히 3월과 4월에 약 80W/㎡이상의 높은 분포도를 보였다.

6.3 풍력발전시스템의 공동주택 단지내 설치계획

본 연구에서는 공동주택 단지 내에 풍력발전 시스템 설치계획은 다음의 두 가지 방법으로 고려하였다. 즉, 한 가지는 풍력발전의 전제 조건 중 풍력에너지가 주변건물에 크게 영향을 받지 않고 풍력에너지 밀도 값도 우수한 20층 높이의 옥상에 설치하고자 하였다. 그리고 나머지 한 가지는 공동주택 단지 내 건물 배치 및 주위의 국지적 풍황에 따라 영향을 받는 단지 내 지상의 녹지공간에 설치하는 방법이다.

따라서, 이와같은 두가지 방식을 적용시키기 위하여 풍력발전시스템을 다음과 같이 선정하였다.

(1) 시스템 기종선택

풍력시스템의 기종선택은 공동주택 단지내 지상의 녹지공간에는 2m/s의 기동풍속에 적용할 수 있는 5kW급을 선정하였으며(표 4, 그림 13 참조), 20층 높이의 공동주택옥상에는 풍속 및 에너지밀도 분석결과 지상보다 풍속이 높게 예측되어 10kW급[5]의 제품을 각각 선정하였다(표 5, 그림 14 참조). 특히, 10kW급 사용에 따른 월별 출력량은 5 kW급 출력량보다 높은 값을 나타냈으며 풍속이 강한 1-4월경에는 여름철의 두배 이상의 높은 출력량을 보이고 있었다.

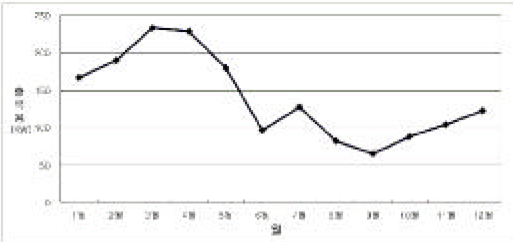


그림 13. 5KW 풍력시스템의 월별 출력량

5) 풍력발전기에서 발생되는 전력은 기본적으로 AC로서 축전지에 저장한 후 DC로 사용하게 되는 것이며 Converter를 통해 AC로 사용할 수도 있고 Inverter-converter로 전력계통에 직접 연계할 수도 있음.

표 4. 공동주택 단지내 지상층 녹지지역의 적용시스템 사양
(5 kW)

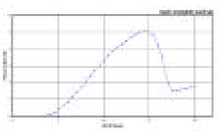
specification	5 kW
Cut Up Wind Speed	3 m/s
Cut In Wind Speed	3.5 m/s
Rated Wind Speed	14 m/s
Rated Power	5kW
Rotor Speed	120 - 750
Rotor Diameter	5.1 m
Weight	250kg
Blade Material	Pultruded Fibreglass
DC Voltages Available	48V, 96V, 110V, 120V
	

표 5. 공동주택 옥상 20층 높이의 적용 시스템 사양

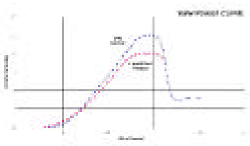
specification	10kW
Cut Up Wind Speed	3 m/s
Cut In Wind Speed	4.0 m/s
Rated Wind Speed	14 m/s
Rated Power	10kW
Rotor Speed	110 - 600
Rotor Diameter	7 m
Weight	500kg
Blade Material	Pultruded Fibreglass
DC Voltages Available	110V & 120V
	

그림 14. 10kW 풍력시스템의 월별 출력량

(2) 풍력시스템 설치계획

가) 공동주택 단지 내 옥상설치

바람은 건물높이가 높을 수록 상부에 강한 풍속을 가지므로 공동주택 단지의 20층 건물 높이에서의 풍속 및 에너지밀도는 평균풍속 3.77m/s, 최대풍속 22.29m/s로 산정되었고, 이에 따라 비교적 기동풍속과 정격풍속이 높은 10kW급을 선정(표 5참조) 하여 다음과 같이 설치하였다.

즉, 공동주택 단지내 20층 옥상에서의 풍력발전시스템 설치는 10kW급 기기의 로터길이는 주풍향에 대한 종열 이격거리 5RD(Rotor Diameter, 대형인 4-5 RD 면충분)를 고려하여 산정한 결과 7m 이므로 총 약 35-49m정도의 이격거리를 유지해야 한다. 따라서, 이와같은 이격거리를 고려하여 본 연구의 대상인 공동주택 단지내 옥상 전체의 최대설치가능대수 약 15대로 산정되었다.

이 때, 풍력발전을 이용한 연간최대 전력량은 89499.3kWh(5966.62 * 15)이다.[6)]

6) 공동주택의 풍력발전시스템의 출력성능
풍속에 대한 출력특성은 성능곡선 혹은 출력곡선에 의해서 풍력발전시스템의 성능을 나타내고 있다. 풍력발전기 제조사의 성능곡선에 따라 년간발전량은 다음식으로 구할수 있다.

$$\text{년간발전전력량(kWh)} = \sum (V_i \times F_i \times 8760(h))$$

여기서 Visms 풍속계급 i의 발전출력(kW)이며 Fi는 풍속계급 i의 출현율을 나타낸다. 위의 식을 이용하여 선정시스템의 공동주택유형별 년간발전전력량을 추정하였으며 그 결과 20층형 10kW급의 경우 5966.62kWh, 5kW급의 경우 1684.23kWh를 나타내고 있었다.

그림 15. 대상 공동주택 단지내 옥상의 풍력발전시스템의 배치

그림 16. 20층 옥상에 설치된 풍력발전기

나) 공동주택 단지내 지상 녹지지역 설치

① Zoning

공동주택 단지의 지상층 녹지지역의 풍력발전 설치는 앞절의 옥상과는 달리 여러 가지 변수 등 국지적 풍황에 따라 장애현상이 발생함을 고려하여 다음과 같이 죠닝(Zone 1과 Zone 2로 구분)을 하였다. 즉, 공동주택 단지의 중심축부분은 난류가 심하게 발생할 수 있는 와류형성지역으로서 풍속을 저해 할 수 있어 이 지역을 중심으로 두개의 Zone으로 구분하였다(그림 17 참조).

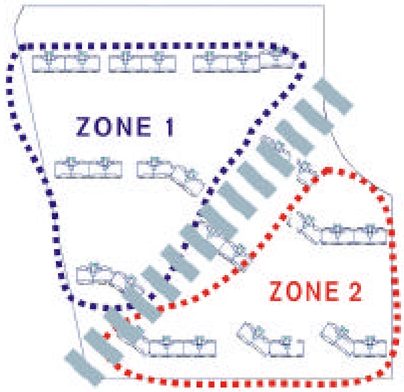


그림 17. 두 개의 Zone으로 분할

② 설치 가능지역 분석

본 연구의 공동주택 단지의 배치는 일렬 배치형태를 띄고 있으며 특히, 주동길이의 1/2배내외에서 풍속이 1.2배까지 상승이 가능함을 고려하여 주동길이(H)의 1/2배 지역을 설치 가능지역으로 분석하였다(그림 18 참조).

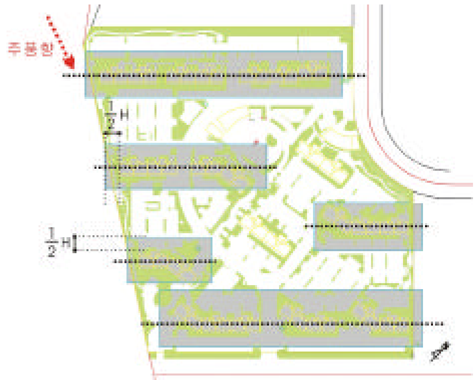


그림 18. 공동주택 지상층에서의 설치 가능지역 분석

③ 설치

앞절의 ①, ②의 항목을 고려하고 풍력발전시스템의 이격거리에 의하여 즉, 5 kW인 경우Rotor Diameter 5.1m 을 적용하면 ZONE1 은 8대, ZONE 2는 6대로 총 14대가 예측되었다(그림 19, 20 참조).

이 때, 5kW급은 20층형 옥상에 설치한 10 kW급 보다는 풍속이 저하되고 전력량도 줄어들어 월별 전력생산량은 다음과 같다.

즉, ZONE 1의 연간 전력생산량=8×1684.23 kW =13,473.82kW

ZONE 2의 연간 전력생산량=6×1684.23kW =10,105.37kW

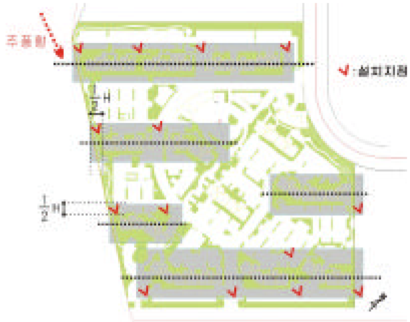


그림 19. 공동주택 지상층 녹지지역의 풍력발전 배치도

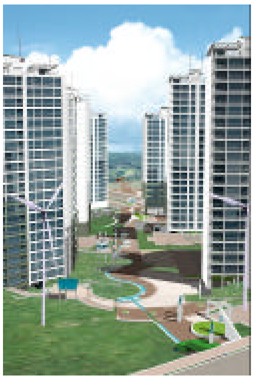


그림 20. 공동주택 지상층 녹지지역에 설치된 풍력발전시스템의 입면도

7. 소형풍력발전의 경제성분석[7)]

7.1 경제성 분석방법(발전원가 비교법)

발전원가는 최종 발전주체가 전력소비자로부터 회수해야 할 최소 필요수입액에 해당하며, 이 방법은 생산에 필요한 총비용을 판매전력량으로 나누어 단위 발전원가를 계산한다.

발전원가의 구성요소로는 고정비, 변동비 및 사회간접 비용 및 효과등이 있으나, 본 연구에서는 풍력발전시스템이 갖는 사회간접비용이나 효과등은 고려치 않고 특히, 본 풍력 건설사업이 신규발전임을 고려하여 균등화 발전원가로 산정하였다.

균등화 발전원가(Levelized Generation Cost)란 신규 발전소의 설정 경제 수명동안의 소요비용(고정비, 운전 유지비, 연료비)을 할인율에 의하여 기준시점의 현재가치로 환산하고 그 값을 기준시점으로 할인된 총 전력생산량으로 나눈 금액이다(식 3참조).

이 방법은 국가내 또는 국제간의 대등한 전력서비스에 대한 투자 선택 비교의 합리적 기준으로 사용된다.

$$균등화\ 발전원가(Lc) = \frac{\sum_{t=0}^{n} (c+m+F)(1+e)^t/(1+r)^t}{\sum_{t=0}^{n} [Gt\times(1-Ap)\times Cf\times H](1+e)^t/(1+r)^t}$$

(식3)

7) 풍력발전 경제성 분석의 기본적인 산정조건 : 총시설용량/ 총공사비(추정) :500만원/ kW×시설용량/ 이자율 할인율=연6%/ 법인세 및 제세=투자비의 0.51%/ 보험료=투자비의 0.22%/ 운전유지 및 수선비=투자비의 0.5%/ 운전수명후 잔존가치=총 공사비의 20%/ 정률 감가상각률=연 4.0%/ 공사기간=0.5년/ 공사기간중 이자=비산정/ 풍력시스템 내구수명=20년/ 총초기투자비용=직접건설비+간접건설비+계통연계비+공사기간중이자/ 할인률을 감안한 투자비용의 현재가치를 산정하는 자본회수계수/ 연간투자비용=(자본회수계수+감가상각률)×실초기투자 비용/
따라서, 이런 모든 경제성 분석 요소와 비용을 감안하여 다음과 같이 서울시에 설치되는 사업의 소형 풍력발전기 기종의 최종 발전원가는 다음과 같이 계산.

$$발전원가 = \frac{연간투자비용+고정유지관리비}{연간\ 총발전량} + 변동유지관리비$$

여기서,

C=고정비(자본비+감가상각비+법인세+보험료), m=운전유지비, f=연료비, Gt=시설용량, Ap=소내이용률(%), Cf=설비이용률(%), H=발전시간(1년=8,760시간), t=가동년도, n=발전소수명기간, e=물가상승률(%), r=할인율(%)

따라서, 신규 풍력발전시스템의 건설에 따른 경제성을 설비용량, 건설기간, 수명기간, 설비이용율, 이자율 등에 관한 기준에 따라 산정한 결과는 다음과 같다(표 6, 7 참조).

표 6. 건물 소형 풍력발전시스템 경제성 분석

분석 \ 내용	내역	비고
평균 발전원가(원/kWh)	260.07	기당 평균발전원가
연간 발전량(kWh/년)	160,900	
연간 전력판매비(천원/년)	17,322	할인율6% 설계수명20년
연간 전력생산비(천원/년)	41,845	107.66원/kWh적용
연간전력생산 평균손실(천원/년)	△24,523	
연간 저감 온실가스량(톤/년)	154.6	석탄화력 대비
배출권 거래비용(천원/년)	35,805	미국 $193/TC 적용 (환율:1,200원/$)
실 전력생산 수익(천원/년)	11,282	

표 7. 환경개선 효과를 고려한 사업의 경제성 분석 (온실가스 거래제도 시행 전제)

분석 \ 내용	내역	비 고
총 공사금액(천원)	300,000	평균공사비5,000천원/kW
총발전량(kWh/년)	160,900	
자본회수계수	0.0871846	할인율 6% 수명20년
감가상각 비율(정율법)	0.04	
연간 투자비용(천원)	38,155.38	
연간 정유지비용(천원)	3,690	
발전원가(원/kWh)	260.07	B/C 비율 : 0.414

* B/C : Benefit/Cost

표 6의 경제성 분석의 결과를 살펴보면 발전 사업(B/C 비율)자체로는 경제성이 약하다고 할 수 있지만 표 7의 환경 개선 비용을 고려한다면 실질적인 수익이 발생하고 있음을 알 수 있다.

또한, 본 경제성분석에서는 건물에서 지표면 풍속의 1.5배 정도로 가정하였는데 고도나 형상에 의한 풍력 에너지의 증폭의 정도가 2.5배 이상까지도 가능함을 고려한다면 그 경제성은 더욱 상승될 것이다.

특히, 운송이나 A/S, 세금 등으로 인한 고가의 외국 풍력발전기를 수입하지 않고 저렴한 국내 풍력발전시스템이 사용된다면 풍력발전사업 그 자체로서도 경제성이 있다고 판단 할 수 있다.

8. 결 론

본 연구는 대체에너지이며 청정에너지인 풍력을 이용한 소형발전시스템을 건물에 적용시키고자 하는 것으로 그 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 풍력발전 시스템을 적용하기 위해서는 지역별 풍력자원 분석이 먼저 필수적으로 수행되어야 한다. 우리나라의 경우 계절별 월평균 풍속은 여름과 초가을사이가 가장 작게 그리고 겨울과 초봄에 이르기까지 가장 크게 나타났고 이 때, 주풍향은 서풍향(기상청 자료)으로 밝혀졌다. 특히, 서울 및 경기지역의 도심지역에서는 약 2-3m/s가 넘는 비교적 높은 평균풍속을 가지고 있어 소형풍력발전의 적용이 가능한 것을 확인하였다.

둘째, 풍력발전의 건물적용시 소음문제는 최근 기술의 급격한 발달로 소형풍력발전기의 경우 약 53-55dB정도로 공동주택내 소음기준과 비슷한 수준을 나타내고 있어 주변지역에 큰 소음장애를 일으키지는 않는 것으로 나타났다. 또한, 하중문제에서 소형인 약 20kW급 까지 건물 옥상에 설치시 기둥과 보 또는 슬라브의 보강 등은 필요치 않는 것으로 나타났다.

세째, 대형풍력발전기인 경우 회전익의 직경이 커서 전파장애를 초래할 수 있지만, 소형인 경우 최근 개발된 목재 및 섬유유리(fiberglass)의 블레이드를 사용할 경우 전파장애 측면에서 문제가 없는 것으로 밝혀졌다.

네째, 풍력발전시스템은 최근 그 형상만으로도 환경친화적인 이미지를 연상시키고 랜드마크적 역할이 가능하여 건물에 적용시 건물의 입면형상과 연계된 디자인 전략이 필요함을 제시하였다.

다섯째, 1000세대 20층 규모의 공동주택단지내 풍력발전시스템을 적용시키기 위한 Case study 결과, 공동주택 단지내에서의 풍력발전시스템 적용계획은 두 가지 방법을 제시하였다. 먼저 단지내 옥상에는 저층보다 풍속이 우수하여 소형 중에서도 10kW급의 설치를 제안하였다. 이때, 설치댓수는 이격거리를 고려하여 단지내 전체에 총 15대가 설치 되었다. 그리고 또 한가지 방법으로 단지의 지상층인 경우에는 옥상보다 풍속이 저하되어 5KW급의 소형을 설치하였다. 특히, 단지내는 중앙의 난류발생 지역을 피하여 두개의 zone으로 나누어 이격거리를 고려하여 ZONE-1은 8대, ZONE-2는 6대의 총 14대의 5 KW급 소형풍력발전이 설치될 수 있음을 제안하였다.

여섯째, 신규 풍력발전시스템의 건설에 따른 경제성을 분석하기 위해서 경제성에 직접 영향을 미치는 제반 조건 등을 고려하여 계산한 결과, 비록 소형풍력발전이 발전원가가 높지만 환경개선비용, 고도나 형상에 따른 풍력에너지증폭도 등을 고려한다면 실질적인 수익이 발생하고 있다고 판단할 수 있다. 특히, 추후 국내실정에 알맞는 기종이 개발되어 고가품의 외국기종과 비교될 때 그 경제성은 한층 증가한다고 예측할 수 있다.

따라서, 본 연구에서 수행한 소형풍력발전시스템의 건물적용과제는 오늘날, 우리에게 주어진 에너지보존과 지구환경오염 문제 해결, 더 나아가 우리의 생존과 직결되어 있음을 고려할 때 이에 대한 지속적인 연구개발 그리고 정책적, 제도적 장치 등의 뒷받침으로 계속 확대되어 21C 쾌적하고 건강한 주거환경을 창출하도록 해야 할 것이다.

참고문헌

1. 강소연, "공동주택단지내 풍력발전시스템의 적용방안에 관한연구", 중앙대학교 대학원, 석사학위논문, 2002.
2. 강용혁, "그린빌딩과 에너지기술", 『한국그린빌딩협의회지』 제1권 1호, 2000. 12.
3. 김광호 외 1인, "풍력에너지의 이용", 『설비저널』 제30권 1호, 2001.01
4. 기상청, "한국기후표 제Ⅰ권", 1991.6.
5. 박경호 외 2인, "국내의 풍력자원 특성 분석", 태양에너지학회지 제10권 2호, 1990.
6. 윤재옥, "서울지역의 바람특성과 확률분포(와이블분포)를 이용한 풍향, 풍속 예측에 관한 연구", 『대한건축학회논문집』 제8권 4호, 1992.4
7. 한국태양에너지학회, 『태양에너지 핸드북』, 태림문화사, 1991.
8. Green, Jim, "*Small Wind Turbine Applications : Current Practice in Colorado", Colorado Renewable Energy Conference*, NREL, 1999.9
9. Hopkins, William, "*Small to Medium Size Wind Turbines : Local Use of a Local Resource", Renewable Energy 16*, 1999, p.944-947
10. Milligan,.R., "*Choosing Wind Power Plant Locations and Sizes Based on Electric Reliability Measures Using Multiple-Year Wind Speed Measurements", U.U. Association for Energy Economics Annual Conference*, 1999.8
11. 木村健一 編. *建築環境學 1, 2*. 東京 : 丸善株式會社, 1993.
12. 木村健一 編. *新建築學大系*. 東京: 丸善株式會社, 1993.

 E-mail : jcpark@yungmin.ac.kr