대한기계확회 주최 제11회 전국학생설계경진대회(2O21년)



참가부	대학부							
참가분야	공모주제 (o) / 자유주제 ()							
참가팀명		마그네틱 스피드						
설계제목	소형풍력발전기 효율성 향상을 위한 마그네틱 베어링 개발							
지도교수/교사	(소속)부산대학교 기계공학부(성명)김송길							
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소			
	조성원	부산대학교 기계공학부						

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	조성원	부산대학교 기계공학부 / 3학년	
2	김은호	부산대학교 기계공학부 / 3 학년	
3	박진수	부산대학교 기계공학부 / 3 학년	
4	이준혁	부산대학교 기계공학부 / 2 학년	
5	이재백	부산대학교 기계공학부 / 3 학년	

	설계 요약문
참가분야	공모주제 (o) / 자유주제 ()
참가팀명	마그네틱 스피드
설계제목	소형풍력발전기 효율성 향상을 위한 마그네틱 베어링 개발
대표자명	조성원
요약문	설계배경 기계 시스템에서 마찰에 의한 에너지 손실로 인하여 기계 시스템의 효율은 60%를 넘지 못한다. 그린 재생에너지 중 하나인 소형풍력발전기에서 축 지 지를 위해 장착된 기계적 베어링에서 마찰 에너지 손실을 최소화를 위해 마 그네틱 베어링 설계를 진행하였다. 본 설계에서는 도심 내부에서 사용할 수 있는 소형 풍력발전시스템에 적용 목적으로 베어링 시제품 제작을 통해 널 리 사용되는 볼 베어링과 비교하여 성능 검증을 목표로 하였다. 설계내용 영구자석을 이용한 마그네틱 베어링은 3D 모델링을 통해 설계되었으며 3D 프린터를 활용하여 제작하였다. 영구자석은 시중에서 쉽게 구할 수 있는 N35 등급 네오디뮴 자석을 이용하였고, 풍력발전기 대부분 하중을 받는 축 의 레이디얼 방향 하중은 영구자석의 자력을 이용하여 내륜과 외륜이 부상 되어 축 회전 시 발생할 수 있는 물리적 마찰 점을 없앴다. 진동에 특화된 발전기도 설계하여 소형풍력발전기를 제작 및 풍속에 따른 발전 효율성을 측정하고, 기계적 베어링을 활용한 경우와 비교하여 그 우수성을 증명하였다.
	설계결과 마그네틱 베어링설계를 통해 제작한 소형풍력발전기 시제품의 진동 및 발전 성능테스트를 수행하였다. 1.5 m/s ~ 2.1 m/s 구간의 낮은 풍속에서부터 마 그네틱 베어링을 이용한 소형풍력발전기의 발전이 시작되었고, 풍속 5.5 m/s 까지 테스트한 결과, 모든 풍속에서 저진동/저소음의 안정적인 발전이 되었 고 볼 베어링을 이용하였을 때 비하여 높은 전압이 측정되는 것을 확인하였 다. 이를 통해 마그네틱 베어링이 마찰에 의한 에너지 손실을 최소화하며 안 정적으로 축 하중 지지로 소형풍력발전기에 적용 가능하다는 것을 확인하였다. 기대효과
	평균풍속이 낮은 도심 속 풍력발전 자원으로 활용이 가능하다. 특수 제작된 원자재가 없고 반영구적 사용이 가능하며 낮은 단가로 경제성을 가진다. 또 한 개발된 마그네틱 베어링은 저소음, 고회전 기계 시스템에 널리 활용 가능 할 것으로 기대된다.
설계프로젝트의 입상 이력	해당 사항 없음

소형풍력발전기의 효율성 향상을 위한 마그네틱 베어링 개발

조성원*·김은호*·박진수*·이재백*·이준혁*·김송길** *부산대학교 기계공학부

Development of magnetic bearings to improve the efficiency of small wind turbines

Seongwon Jo^{*}, Eunho Kim^{*}, Jinsu Park^{*}, Jaebaek Lee^{*}, Joonhyuk Lee^{*}, and Songkil Kim^{*†} *School of Mechanical Engineering, Pusan National University

Key Words: Permanent Magnetic Bearing(영구 마그네틱 베어링), Small wind turbine(소형풍력발전기), Vibration Analysis(진동 분석)

초록: 본 설계에서는 영구자석을 이용하여 내륜과 외륜이 부상된 형태의 마그네틱 베어링을 설계하였다. 설계된 마그네틱 베어링을 자체 제작한 소형 풍력 발전 시스템에 적용하여 마그네틱 베어링의 성능을 평가하였으며, 기계식 베어링을 이용한 발전 성능과 비교하여 그 우수성을 증명하였다. 소형 풍력 발전 시스템은 PLA 소재를 사용한 3D프린터로 제작하였으며 축의 경우에는 동심과 안전을 고려하여 알루미늄 소재를 사용하였다. 최대 풍속 5 m/s에서 회전속도 600 RPM으로 축이 회전하여 10V 전압의 출력을 확인하였으며, 기계적 베어링을 사용한 경우 대비 최대 2.5배 많은 전압이 출력되는 것을 확인 하였다. 본 설계를 통해 제작된 마그네틱 베어링은 소형 풍력 발전 시스템에서 마찰에 의한 에너지 손실을 최소화시켜 높은 발전 효율을 구현할 수 있을 것으로 기대되며, 뿐만 아니라 다양한 기계 시스템에 적용되어 마찰에 의한 에너지 손실을 최소화할 것으로 기대된다.

Abstract: In this design, we developed a magnetic bearing with permanent magnets targeting to improve the electricity generation efficiency of a small wind turbine. To apply the designed magnetic bearing, we fabricated a small wind turbine whose mechanical components were fabricated using 3D printer. The small wind turbine with two magnetic bearings yielded the output voltage of 10 V with a maximum wind speed of 5 m/s tested in the experiments, which was verified higher than when using mechanical ball bearings. Using the magnetic bearing enabled to generate the output voltage 2.5 times higher in maximum than using the mechanical bearing. It is expected that the developed magnetic bearing will reduce energy loss and thus improve the energy generation efficiency of a small wind turbine as well as can be utilized in various mechanical systems with minimizing energy loss.

1. 서 론

한정된 자원이 고갈되는 상황에서 손실되는 에너지를 줄이기 위한 노력이 이루어지고 있다. 회전체를 가지는 복잡한 기계장치의 경우 베어링이 필수로 사용이 되며 마찰, 구름 저항 그리고 발열 등의 에너 지 손실이 일어난다. 현재 베어링 형태는 1800년대 개발되었으며 볼과 같은 구름 요소가 돌아가며 마찰 을 줄인다. 윤활유가 필수로 사용되는 비영구적 시스템으로 진동과 반복하중으로 인한 손상이 발생하면 에너지 손실은 커지게 된다. 베어링 제작업체인 SKF 사는 최근 산업 전반이 고회전 전기 구동으로 바뀌고 있으며 과거 베어링은 정적하중이나 수명을 기반으로 베어링 성능을 판단하였으나 차세대 베어링은 하중을 버 티는 능력과 함께 효율성과 소음이 베어링 시스템을 판단하는 지표가 된다며 차세대 베어링 개발의 필요성을 언급하였다.⁽¹⁾

[†] Corresponding Author, songkil-kim@pusan.ac.kr
 □ 2021 The Korean Society of Mechanical Engineers

기계식 베어링의 단점을 극복하기 위해 내륜과 외륜이 부상되어있는 마그네틱 베어링은 1940년대 개발되었으 며 전자석을 이용한 차세대 베어링으로 주목받았다. 제어 가능한 전자석 베어링은 높은 회전수가 필요한 대형 기계에 적합하나 풍력발전기에 적용되지 않는 이유는 전력 발전을 위해 전자석을 사용하는 것이 비효율적이기 때문이다. 전력을 사용하지 않는 영구자석을 이용하게 되면 자석의 무게가 커지며 진동제어가 불가능하다. 용 량이 크지 않고 가벼운 소형풍력발전기의 경우 작은 크기의 영구자석을 이용할 수 있으며 짧은 블레이드를 가 져 적절한 배치에 따라 진동제어가 가능하다. 마그네틱 베어링을 사용한다면 소형풍력발전기의 단점인 소음과 잦은 정비성이 해결되며 효율성이 증대하여 도심형 풍력발전기로 가능하다. 본 설계에서는 영구자석을 이용한 마그네틱 베어링 설계와 시제품 제작을 수행하였으며, 제작된 마그네틱 베어링을 소형풍력발전기에 적용하여 기존 볼 베어링 대비 소형 풍력발전 효율 증대를 검증하였다.

2. 설계핵심내용

2.1 적용할 시스템과 문제 정의

2.1.1 마그네틱 베어링 적용 시스템

풍력발전은 면적당 출력이 높고 유해 물질의 배출이 없으며 에너지 가격 균형점(화석연료 발전단가와 신재생에너지 발전단가가 같아지는 시기)으로 가는 중요한 역할을 한다. 대형풍력발전기는 높은 풍속에 서 많은 전력을 얻을 수 있기에 친환경 에너지 중 주목받고 있는 에너지원이다. 하지만 소음이 발생하 고 넓은 부지가 필요하여 산지나 해양 등 도심에서 멀리 설치된다.

소형풍력발전기는 대형부지가 필요 없고 대형풍력발전기 대비 높은 효율로 대두되고 있지만 Fig. 1에 서 알 수 있듯이 현재 한국의 소형풍력 설치 현황은 타 선진국 대비 매우 미비하다. 한국이 소형풍력발 전기에 집중해야 하는 이유는 2~3m/s의 낮은 평균풍속과 일정하지 않은 풍향으로 인해 대형 풍력발전에 요구되는 풍속 조건을 충족시켜주지 못하기 때문이다.⁽³⁾ 소형풍력발전기의 1kW와 300W 풍력발전기의 효율성 실험을 해양 지역에서의 발전 실험이 아닌 내륙지역의 발전 실험으로 국내 실정에 맞는 유의미 한 실험 결과를 확인해볼 수 있다. Fig. 2(a)에 따르면 1kW 발전기는 5m/s 이하의 풍력에서는 발전이 이 루어지지 않았으나 300W 발전기는 1m/s 풍력에서부터 전력이 생산된다.⁽⁴⁾ Fig. 2(b)를 보면 평균풍속이 낮은 2013년 10월에 300W급 풍력발전기가 누적 발전량이 많은데 이는 1~3m/s의 낮은 풍속에서 발전이 시작되어 누적 발전량 측면에서 보면 300W급 풍력발전기가 1kW급 풍력발전기보다 효율적이라는 것을 알 수 있다⁽⁴⁾. 이는 도심형 소형풍력발전기로는 300W급이 적합하며, 본 설계에서 제작되는 마그네틱 베 어링 적용 풍력발전시스템을 300W급 소형풍력발전기를 타겟으로 한다. 이를 기반으로, 마그네틱 베어링 을 설계하고 실제 적용을 통한 에너지 손실 저감 및 발전 성능 향상 효과를 증명하고자 한다.



Fig. 1 Total cumulative installed capacity by country⁽²⁾



Fig. 2 (a) Comparison of power generation and (b) Comparison of cumulative power generation.⁽⁴⁾

2.1.2 설계의 문제 정의

영구자석을 이용한 마그네틱 베어링설계에서 중요하게 고려되어야 하는 설계 인자는 시스템 무게 및 작동 시 가해지는 하중을 충분히 지지할 수 있어야 하며, 진동을 최소화되어 안정적인 구동이 가능해야 한다. 내륜이 자력에 의해 부상되어 축을 고정하고 외부 동력에 의해 회전하게 된다. 가장 큰 문제인 축 이탈은 회전 시 발생하는 편심을 고려하여 알맞은 자석을 배치 및 설계하여 축을 부상시켜야 한다. 또 한 회전수(RPM)에 따른 진동제어가 불가한 경우 간섭으로 인한 소음과 효율성 하락이 발생할 수 있다. 이런 문제점들을 해결하기 위해선 다음과 같은 설계 조건이 요구된다.

- ① 베어링 자중 및 외력 분석을 통한 내륜 부상
- ② 고회전에서 진동제어
- ③ 적절한 자석 배치 설계로 효율성 증대
- ④ 외력에 의해 발생하는 진동제어 및 저소음 설계

2.2 선행 연구 및 설계 이론

2.2.1 마그네틱 베어링 안정성 확보에 관한 선행 연구

Fig. 3(a)와 같이 같은 선상에 극성으로 있는 마그네틱 베어링은 외력이 가해지면 내륜이 쉽게 이탈할 수 있다. 마그네틱 베어링의 불안정성을 극복하기 위해 선행 연구⁽⁵⁾에서는 Fig. 3(b)와 같이 외륜과 내륜 사이 간격을 주어 불안정한 자력을 axial force로 상쇄시켜 안정성을 가질 수 있게 만들었다. Fig. 4는 외 륜과 내륜의 offset에 따른 축 방향으로 발생하는 힘의 관계를 나타낸 것이다. 이를 통해 다음과 같은 데 이터를 얻을 수 있다.

- ① Offset이 커질수록 axial force는 커지고 radial force는 작아진다.
- ② Offset이 줄어들게 되면 외륜과 내륜 사이가 불안정하게 된다.

따라서 본 설계는 1~3mm 사이의 offset 위치를 설계하여 마그네틱 베어링의 안정성을 높인다.



Fig. 3 Magnets with zero and axial offset⁽⁵⁾



Fig. 4 Axial force variation with axial displacement⁽⁵⁾

2.2.2 외륜 형상에 따른 구름 저항성 및 진동

선행 연구⁽⁵⁾에서는 외륜 상단 자석의 배치에 따른 안정성과 구름 저항 관계를 분석하였다. Fig. 5에서 와 같이 3가지 형태의 외륜인 Configuration 1(원통 자석 적용), Configuration 2(하단 반원 자석 적용), Configuration 3(하단 반원과 상부 45° 각도로 자석 적용)에 대하여 회전 시 발생하는 진동과 허용 하중 을 분석하였다.



Fig. 5 Different Configurations of magnetic bearing used in frequency analysis⁽⁵⁾

Fig. 6은 외륜 형태에 따른 중심 사이의 거리와 허용 하중의 관계를 나타내며, 이를 통해 얻을 수 있 는 정보를 요약하면 아래와 같다. 즉, 외륜 상부에 자석이 장착될 경우, 외륜 상부에서 내륜을 누르는 힘이 발생하고, 가장 높은 효율성은 Configuration 2 형상이다. 외륜 180° 상부에 자석이 장착되지 않은 Configuration 2 구조가 가장 높은 하중을 견딜 수 있다.
 외륜 360° 자석 형태의 Configuration 1 구조가 가장 낮은 하중을 견딜 수 있었다.



Fig. 6 Variation of radial force with eccentricity⁽⁵⁾



Fig. 7 Frequency spectrum of (a) Configuration 1, (b) Configuration 2 and (c) Configuration 3⁽⁵⁾

Fig. 7은 형상마다 주파수에 따른 진동의 크기 관계를 나타낸 것이다. 3가지 형상에 대한 진동 데이터 를 살펴보면 아래와 같은 결론을 내릴 수 있다.

- ① Configuration 1 형상이 가장 안정적인 진동 데이터를 보이며
- ② Configuration 2 형상이 가장 높은 진동수를 보인다.

2.2.3 진동과 효율성을 고려한 마그네틱 베어링 구조

Configuration 1 형상과 같이 전체가 자석으로 설계된 외륜은 회전 시 안정성은 높지만 구름 저항성이 커진다. 반면, configuration 2 형상처럼 하부만 자석 배치된 외륜은 회전속도가 올라갈수록 축 진동은 심 해지지만 구름 저항성은 작다. 그리고 configuration 3과 같이 외륜 하부 전체와 상부 45°에 배치된 설계 는 구름 저항성과 안정성이 다른 형상들의 중간값을 가진다. 선행 연구 결과를 바탕으로 볼 때, 소형풍 력발전기가 받게 되는 하중과 회전 시 발생하는 진동을 고려하여 configuration 3 형상을 참조하여 외륜 설계가 필요할 것으로 판단된다.

2.3 설계 목표 및 차별성

앞선 내용에서 300W급 소형풍력발전기의 많은 누적 발전량과 유지 보수가 거의 필요 없다는 사실을 확인할 수 있었다. 그에 따라 발전량 감소와 유지 보수의 주된 원인인 베어링의 마찰을 줄인다면 보다 효율적인 발전이 가능하다고 판단된다. 따라서 본 설계는 소형 기계 시스템의 한 예로 소형풍력 발전기 를 채택하여 설계 및 기존에 쓰이던 볼 베어링과 비교 분석을 통해 성능을 검증하는 것을 목표로 한다. 이와 더불어 영구자석 자기 베어링이 쓰일 수 있는 여러 가지 기계 시스템을 나열하여 산업 전반에 미 칠 수 있는 기대효과를 보여주고자 한다. 본 설계에서 제작하고자 하는 마그네틱 베어링의 차별성은 아 래와 같이 요약될 수 있다.

- 특허로 등록이 되었거나 선행 연구로 진행이 된 마그네틱 베어링의 경우 특수 제작된 자석을 이용 하였으며 단가가 높다. 하지만 본 연구는 시중에서 쉽게 구할 수 있는 N35 등급의 네오디뮴 자석 을 이용하여 제작하여 간단한 구조로 오작동 가능성이 매우 낮으며 경제성을 기대할 수 있다.
- ② 마그네틱 베어링의 큰 문제로 여겨지는 진동과 축 이탈을 제어할 수 있는 최적의 외륜 설계를 전 륜 베어링과 후륜 베어링 각각 진행하여 통합된 베어링 시스템을 구축하는 것이다.
- ③ 자기력은 스프링과 같은 힘이기 때문에 선형적으로 제어할 수 있을 뿐 물리적으로 고정이 되어있지 않기 때문에 움직임이 발생한다. 전력 발전 시 축 움직임은 발전 효율에 치명적인 영향을 주는데 마 그네틱 베어링에 특화된 발전기를 설계하여 통합적인 마그네틱 베어링 기반 발전시스템을 설계한다.

2.3.1 전체구조 및 베어링 시스템의 도식도

Fig. 8(a)는 소형풍력발전 시스템의 시제품을 보여주며, ① 축, ② 마그네틱 베어링, ③ 프로펠러, ④ 지지대, ⑤ 발전기로 나눌 수 있다. 같은 ① 축으로 연결된 두 개의 ② 마그네틱 베어링이 축의 레이디 얼 방향의 힘을, 뒤의 ④ 지지대가 축 방향의 힘을 지지하는 메커니즘으로 작동하도록 설계하였다.



Fig. 8 (a) Prototype of a small wind power generation system supported by two magnetic bearings and (b) the schematic demonstrating the magnetic force between outer and inner races of the bearing

2.4 축, 지지대, 블레이드, 발전기 설계

2.4.1 축(Shaft), 지지대(mount) 설계

Fig. 8(b)와 같이 축 방향 힘이 발생하면 축이 밀리지 않게 지지대가 필요하며 축의 움직임을 제한하였다. 시중에 판매되고 있는 소형풍력발전기의 정보를 참고하여 축 길이는 580mm, 지름은 35mm로 정하였다. 축의 끝부분에 끝이 뾰족한 철심을 부착하여 면적 부위를 최소화하고, Fig. 9(b)와 같이 지지대 (mount)는 축과 만나는 부분에 소형 베어링을 설치하여 마찰저항을 감소시켰다.



Fig. 9 (a) 35mm diameter aluminum hollow rod and (b) the mount to support axial load

2.4.2 블레이드(blade)

소형풍력발전기의 발전을 위한 블레이드 선정도 중요하다. 단면적이 넓어 낮은 풍속에서도 회전이 가 능한 프로펠러의 형상이 요구되며 Fig. 10과 같이 지름 500mm의 블레이드 모델을 3D프린터로 제작하였다.



Fig. 10 (a) 3D model and (b) 2D drawing of the blade

2.4.3 발전기(generator)

마그네틱 베어링이 장착된 소형풍력발전기의 경우 축이 부상되어있어 흔들림이 발생할 수 있다. 축의 진동으로 인해서 발생하는 마그네틱 베어링에 적합한 발전기의 설계가 요구된다.

- ① 발전기 본체 : 기존 발전기의 경우 발전기 내부 축에 볼 베어링이 장착되어 원판이 돌아간다. 마그 네틱 베어링의 경우 발전기 본체가 외륜과 같은 지면에 장착되어 있고 발전기 원판이 축 사이의 간섭이 발생할 수 있다. 약 1000 RPM에서 발생하는 축의 진동범위는 3.5mm 이내로 설정하고, 강 풍이나 태풍과 같은 특수한 상황을 고려하여 발전기 본체와 축의 간격을 7.5mm로 설계하였다.
- ② 발전기 원판 설계 : 기성 발전기의 경우 발전 효율을 위해 Fig. 12(a)와 같이 영구자석 원판과 코일을 가깝게 설계하여 효율성을 높인 구조이다. 마그네틱 베어링의 경우 물리적으로 고정되어있는 상태가 아닌 축이 부상 되어있어 기존 발전기를 사용하면 간섭이 생길 수 있다. 문제점을 해결하기 위해 코일과 발전기 원판의 간격이 넓어지면 발전 효율이 하락한다. 원판과 코일이 멀어지면 발생하는 자기력이 Fig. 12(b)와 같다. Fig. 12(c)는 코일 양옆으로 두 개의 원판을 설치하여 원판 거리로 인한 발전 효율 하락을 보완한다.



Fig. 11 (a) generator 3d model and (b) generator drawing



Fig. 12 (a) A widely used generator used for 300W wind power generators, and the schematic representations of the magnetic field generated by the coil (a) with one side disk and (c) with two side disk



Fig. 13 (a) 3D model and 2D drawing of the magnet holder

③ 발전기 제작 및 기판 설계, 제작 : 3D프린터와 에나멜선을 이용하여 발전기를 제작하였으며 원판 의 자기 상이 바뀔 때마다 전류의 흐름이 변화함으로 다이오드를 이용하여 전류가 한 방향으로 흐 르도록 설계하였고 전압 안정화를 위해 커패시터를 활용하여 기판을 제작하였다.



Fig. 14 The circuit of generator

2.5 마그네틱 베어링설계

2.5.1 설계 목표

마그네틱 베어링설계에 있어 중요하게 달성되어야 하는 목표는 아래와 같이 3가지로 요약될 수 있다.

- ① 풍력발전기의 자중을 분석하여 자석을 선정, 안정적인 부상을 위한 자석 배치 설계
- ② 회전수 증가 시 발생하는 진동을 제어하는 외륜 설계
- ③ 베어링 형상에 따른 효율성 비교를 통한 설계

2.5.2 하중 분석

소형풍력발전기의 부품 무게를 측정하여 베어링에 가해지는 하중을 분석한다. 축 길이와 블레이드의 크기는 기존 300W급 소형풍력발전기의 정보를 취합하여 정하였으며 발전기의 경우 안정적인 지지를 위 해 전륜 베어링 (bearing 1)과 후륜 베어링 (bearing 2) 사이에 장착하여 하중을 분산시켰다. Table 1은 소 형풍력발전기를 구성하는 각 부품의 무게를 나타낸다. 각 부품의 무게를 고려하여 Fig. 15와 같이 자유 물체도를 표현하였다. 2개의 마그네틱 베어링은 축의 왼쪽 끝단으로부터 각각 110mm와 480mm 떨어진 곳에 초기 위치로 두고 설계를 진행하였다. 이때 각 베어링이 지지하게 되는 하중은 전륜 베어링 (bearing 1)의 경우에는 19.18N이며, 후륜 베어링 (bearing 2)는 22.204N의 하중을 지지하게 된다.

Parts	무게 (N)
Blade	2.746
Bearing1(전륜) 내륜	5.886
Bearing2(후륜) 내륜	5.886
Generator magnet weight	2.943
Shaft	3.1853

Table 1 Weight of each part of wind turbine



Fig. 15 Free body diagram for the shaft in the designed small wind power generator

2.5.3 베어링 내륜 설계

선행 연구에서 분석한 마그네틱 베어링 논문에 따르면 링 형태의 특수 제작한 자석이 사용되었다.⁽²⁾ 기성 자석을 사용하여 제작할 경우, 자석 간의 간격으로 일정한 자기력이 발생 되지 않아 축 진동이 발 생할 수 있다. Fig. 16(b)의 형태에 네오디뮴 자석 (20*20*10T) 두 개가 한 쌍으로 결합 되어 들어가며 링 형태의 자석과 같은 자기력을 내기 위해 45° 각도로 촘촘히 배치하였다. 축 지름 35mm를 기준으로 8개의 자석 쌍이 배열된다.



Fig. 16 (a) Drawing of inner bearing and (b) structure with magnets

2.5.4 외륜 하부 설계

외륜 하부는 풍력발전기의 자중을 견디는 역할을 한다. 하중보다 강한 자석을 배치하게 되면 축이 위로 뜨게 되고 발생하는 하중보다 약한 자석을 사용하게 되면 축이 가라앉게 된다. 즉, 알맞은 자석을 사용하여 내륜을 부상시키는 설계가 필요하며 회전 시 발생하는 진동 테스트도 진행하였다. Fig. 15를 바탕으로 3개의 지지점에서 반력을 계산하면 전륜 베어링(Bearing 1)에서 발생하는 하중은 19.18N, 후륜 베어링(Bearing 2)에 발생하는 하중은 22.204N이다.

2.5.4.1 첫 번째 외륜 하부 시제품

□ 설계

내륜과 외륜이 부상하는 힘은 Fig. 17와 같이 2mm 오프셋에서 발생하며 Table 2는 N35 네오디뮴 (20×20×10T)를 세 개를 한 쌍으로 겹쳐 두께 30T로 2mm offset에서 발생하는 자석 간의 힘을 측정한 값이다. 설계 기준이 없어 내륜보다 두꺼운 자석을 사용하여 충분한 자기력이 발생할 것으로 예상, 네 개

의 자석 쌍이 외륜 하부에 45° 각도로 배치하여 첫 번째 시제품을 설계하였다. 제작에 앞서 전륜 베어링 과 후륜 베어링에 발생하는 반력이 달라 Table 2를 통해 축이 평행을 이루는지 수학적 계산을 통해 검증 해보았다.

전륜 베어링: 19.181N= F×(2_{cos}(18°)+2_{cos}(54°))→F=6.232N →약 32mm 부상 후륜 베어링: 22.2044N= F×(2_{cos}(18°)+2_{cos}(54°))→F=7.2146N →약 30mm 부상



Fig. 17 Magnetic force generated by the offset between two pairs of magnets

Fable 2	2	The	force	according	to	the	distance	of	N35	neodymium	(20X20X30T)	with	offset	2 n	$m^{(6)}$
---------	---	-----	-------	-----------	----	-----	----------	----	-----	-----------	-------------	------	--------	-----	-----------

The distance of N35 neodymium (mm)	Force(N)
32	6.2275
31	6.6723
30	7.2061
29	7.7844



Fig. 18 (a) The 2D drawing and (b) 3D printed part for the first-prototype bottom outer race of the bearing



Fig. 19 (a) The schematic showing the direction of reaction forces in the outer race of the bearing and (b) the schematic showing the integrated two magnetic bearings in the designed small wind power generator prototype

🗆 제작 및 테스트

Fig. 20 (a)와 (b)와 같이 3D프린터를 활용하여 시제품 제작하였다. Fig. 20(c)는 제작된 시제품을 임 의로 회전시켜 설계 문제점이 있음을 확인하였다.



Fig. 20 (a) The photography showing the 3D printing process for fabricating the first outer race prototype of the bearing, and (b) the fabricated inner and outer races of the magnetic bearing. (c) The photograph showing the rotation test of the first prototype of the magnetic bearing

□ 문제 인식 및 해결책

정지 상태에서 내륜이 외륜 중앙으로 부상하였으나 축 회전 시 전륜 베어링에서 진동이 발생하였다. 외륜 하부의 자석 간격이 넓어 일정하지 않은 자기력이 발생하여 회전 시 Fig. 20(c)와 같이 순간적 인 처짐이 발생하고 진동이 중첩되어 큰 진동이 발생한 것으로 보인다. 첫 번째 시제품 테스트를 통해 서 확인된 문제를 해결하기 위해 자석 간격을 촘촘히 설계하여 자기력이 일정하게 생성되도록 하고 회 전 시 발생하는 수평 진동을 제어하기 위해 외륜을 타원 형태로 설계하여 축의 진동을 줄이는 해결책을 구상하였다.

2.5.4.2 두 번째 외륜 하부 시제품

🗆 설계

첫 번째 시제품 설계 시 내륜의 위치는 외륜 중앙부로 부상하여 적절한 자석의 양이 사용된 것으로 보인다. 자석 간 간격을 좁게 설계하기 위해서 1쌍의 자석 개수를 3개에서 2개를 1쌍으로 설계한다. 20T 두께를 가진 자석 쌍들의 자기력을 측정하여 Table 3을 도출하였다. 첫 번째 시제품과 같은 부상 높이로 설계하기 위해선 Table 3을 이용하여 수학적 해석을 통해 최적 설계를 진행하였다. Fig. 21(a)와 같이 7개의 자석 쌍이 Fig. 22와 같이 22.5°, 45°, 67.5의 각도를 가질 때 첫 번째 시제품과 근사한 내륜 부상 높이가 되는지 검증해보았다.

전륜 베어링: 19.181 = F×(1+2_{cos}(22.5°)+2_{cos}(45°)+2_{cos}(67.5°))→F=3.8153N →약 34mm 부상 후륜 베어링: 22.2044 = F×(1+2_{cos}(22.5°)+2_{cos}(45°)+2_{cos}(67.5°))→F=4.4167N →약 32.5mm 부상

전륜과 후륜의 내륜 높이는 Fig. 22와 같이 약 1.5mm로 차이가 있으나 첫 번째 시제품과 근사한 값을 가지며 축 수평을 맞추기 위해 자석 개수를 줄이게 되면 하중을 버티지 못하거나 진동 발생의 원인이 된다고 판단하였다. 진동제어 최적화 설계를 위해 외륜 제작 후 자석 높이 조절을 통해 축 수평을 맞춘 뒤 회전 테스트를 진행한다.

Table 3 The force according to the distance of N35 neodymium (20X20X20T) with offset 2 mm⁽⁶⁾

The distance of N35 neodymium (mm)	Force(N)
35	3.6031
34	3.9144
33	4.2258
32	4.5817



Fig. 21 (a) The 2D drawing and (b) the 3D printed part for the second-prototype bottom outer race of the bearing



Fig. 22 Schematic showing the integrated two magnetic bearings in the designed small wind power generator prototype

2.5.5 외륜 상부 설계 2.5.5.1 첫 번째 외륜 상부 시제품 설계 □ 설계

선행된 연구⁽⁵⁾에서 외륜 상부 형상에 따른 진동과 구름 저항성을 확인할 수 있다. 본 설계에서는 논문에 기재된 방식보다 효율성을 높이기 위해 상부 1쌍의 네오디뮴 자석(20×20×20T)만 사용하여 설계 를 진행하였다. 자석 높이를 미세조정이 가능하도록 설계하여 축의 수평 조절이 가능하도록 설계하며 외륜 상부는 진동제어를 초점으로 설계하였다. 외륜 상부에는 네오디뮴 자석(20×20×20T)이 삽입되며 축 중심과 최소 높이 75mm를 주고 볼트를 이용해 자석 높이를 조절할 수 있도록 설계하였다. Fig. 23(b)는 자석이 장착되는 칸이 있고 볼트를 이용하여 상단 자석을 이동하여 축의 수평을 맞춘다.



Fig. 23 (a) The 2D drawing and (b) the 3D printed part of the first-prototype top outer race of the bearing, and (c) the prototype of the shaft-magenetic bearing system showing that the shaft is stably levitated and supported by the designed magnetic bearings

□ 제작 및 테스트

Fig. 24와 같이 축 수평 조절 후 축 회전 테스트를 시행하였다. 블레이드를 장착하여 풍속으로 테스 트를 진행하였고 500W급 대형 선풍기를 이용하여 풍속계로 풍속을 측정하며 축에서 발생하는 진동을 관찰하였다. 낮은 풍속에선 Fig. 25(a)와 같이 안정적으로 회전하였지만, 5.5m/s 풍속에 이르자 Fig. 25(b) 와 같이 전륜 베어링에서 큰 진동과 함께 내륜과 외륜 좌, 우측상부 충돌 후 멈추게 되었다.



Fig. 24 Photographs showing the iterative process for optimized alignment of the shaft and magnetic bearings: (a) adjustment of the shaft axis horizontally, (b) checking the shaft level, (c) shaft zero adjustment and checking the position of the magnetic bearing and (d) checking the level repeatedly



Fig. 25 Test for the shaft-magnetic bearing system for various wind speeds of (a) 1~4.5m/s, showing the stable operation and (b) for the wind speed higher than 4.5m/s at which the magnetic bearing failed to support the rotation of the blade

□ 문제 인식 및 해결책

후륜 베어링의 경우 안정적인 회전을 보여주었으나 Fig. 26과 같이 자기력은 스프링과 비슷한 힘으 로 하나의 자석으로 내륜을 누르고 있어 회전수가 빨라지면 자기력을 받지 않는 외륜 좌, 우측 상단부 로 이탈된다. 특히 전륜 베어링의 경우 바람에 의한 블레이드에 편심이 발생하는데 저속에서는 안정적 이나 RPM이 증가하면 편심이 커져 상부 자석 하나로는 고속에서의 진동제어가 불가능하다.

위 연구⁽⁵⁾에선 상부 45°를 링 자석으로 배치하였지만, 외륜 상부 자석의 개수가 증가하면 첫 번째 시제품보다 효율성이 떨어지게 된다. 진동의 발생이 위, 아래가 아닌 중심으로부터 약 50°좌, 우측상부 로 발생한 것을 파악하였고 상부 중앙을 중심으로 각각 50°간격으로 두 쌍의 자석을 배치 설계하여 효 율성과 진동제어 설계를 진행한다.



Fig. 26 Schematic describing the magnetic force generated at the top of the front bearing

2.5.5.2 두 번째 외륜 상부 시제품 설계 □ 설계

앞선 실험에서 고속 회전에서 전륜 베어링의 이탈이 발생하였다. 후륜 베어링은 고속에서 안정적인 회전을 보여주었으며 전륜 베어링 전용 외륜 상부를 설계한다. 자력은 스프링의 힘과 같아서 많은 자석 을 상부에 사용하게 되면 진동제어는 뛰어나지만 구름 저항성이 발생한다. 첫 번째 시제품을 통한 테스 트 결과를 기반으로 Fig. 27(a)와 같이 네오디뮴 자석 20X20X20T 두 쌍을 각각 약 100°로 배치하여 고 속에서의 안정화를 추구하였다. 자석 높이를 가변식으로 설계하여 진동제어와 최적의 효율을 만들어내 는 높이를 설정할 수 있으며 외륜에 마운트를 설계하여 안정적인 고정과 전방 축 이탈을 가정한 안전장 치를 설계하였다.



Fig. 27 (a) 2D drawing, (b) 3D model and (c) 3D printed part of the top outer race for the front bearing

□ 효율성, 진동제어 실험 및 결과

전륜 베어링의 외륜 상부 형상에 따른 진동제어와 효율성 실험을 진행하였으며 외륜 상부 두 가지 시제품 각각 장착하여 진행하였다. 마그네틱 베어링 전용 발전기 제작 및 장착하여 전류를 생성하였고 아두이노(Arduino) 전압 측정 센서(SZH-SSBH-043)와 가속도 센서 (ADXL345)를 활용하여 데이터 수집하 였으며 파이선(Python) 기반 프로그래밍을 통하여 데이터를 시각화하였다.

효율성

45초 동안 전압값을 측정하여 진동에 따른 전압값을 시각화하여 효율성 비교를 진행하였다. 바람이 불기 시작하는 초기에는 전압 차이가 적지만 5.5m/s에 이르는 20초부터 극명한 차이를 보여준다. 전기 모델을 장착하였을 경우 매우 심한 진동이 발생하는 반면 후기모델은 안정화된 모습을 보였다. 개선한 외륜 상부의 전압이 평균 10.49V, 첫 번째 외륜 상부 시제품을 장착하였을 때 전압이 평균 10.16V가 측 정되며 진동으로 인한 발전 효율 하락으로 외륜 상부 후기모델이 높은 효율성을 가진다는 것을 알 수 있다.



Fig. 28 (a) Experimental set-up for testing the operation and measuring the output voltage of the small wind turbine supported by two magnetic bearings and (b) the graph showing the stable voltage output and comparison of the output voltage according to the arrangement of the outer magnetic bearing

② 진동

아두이노 가속도 센서(ADXL345)를 물리적으로 접촉되어있는 마운트에 장착하여 외륜 형상에 따른 진 동 데이터를 시각화하였다. 해당 실험은 정지한 상태부터 5.5m/s 풍속까지 올린 후 다시 정지할 때까지 진동 변화를 측정한 것이다. Fig. 29를 보면 알 수 있듯이 두 번째 외륜 상부의 경우 일정 고유진동수 부근의 진동을 제외하고는 전기 모델 대비 진동이 적은 것을 확인할 수 있었다. 첫 번째 외륜 상부 모 델의 경우 5.5m/s 풍속에서 높은 진동이 발생하여 발전기와 간섭이 생겨 큰 진동 그래프를 보여준다.

첫 번째 외륜 상부가 낮은 구름 저항성으로 더 높은 전압을 발생해야 하지만 두 번째 외륜 상부가 진 동제어로 인해 약 3%의 높은 전압을 만들어낸다. 전륜 베어링 상부에는 후기모델, 후륜 베어링에는 전 기 모델을 사용하여 Fig. 30과 같이 소형풍력발전기에 특화된 마그네틱 베어링을 설계하였다.



Fig. 29 Vibration data according to the arrangement of the outer magnetic bearing



Fig. 30 Final verision of the small wind turbine system

2.6 전압 및 진동 측정 소프트웨어 설계

볼 베어링과 마그네틱 베어링의 정확한 비교를 위해 전자 계측 장비와 실시간 비교를 위한 소프트웨 어를 설계하였다.

⁻ 전자 측정 장비 : 진동(안정성 평가), 전압(효율성 평가)을 측정하기 위해 각 센서를 하나의 보드에서 처리해줄 아두이노 보드(Arduino UNO 3)를 사용한다. 전압을 측정하기 위해서 SMG사의 SZH-SSBH-043 전압 센서(전압측정범위 : 0 ~ 25V)를 사용한다. 진동 데이터를 측정하기 위해 GY-521 6축 가속도 센서를 사용한다.

- 소프트웨어 : 전자 장비를 이용해서 각 데이터를 시각적으로 가공하기 위해 파이선을 활용하여 데이 터 마이닝 과정을 거친다. 각 데이터 측정을 수행하기 위해서 각 센서와 메인 보드 및 소프트웨어 프 로그램에서 전달되는 방식은 Fig. 31의 알고리즘을 따른다.



Fig. 31 Flow chart describing the data processing for the measured vibration and output voltage

3. 결과 및 토의

3.1 최종 시제품 작동 및 성능실험

풍력발전기 효율성 및 안정성 실험을 위한 풍동실험 환경을 갖추어 진행했다. 300W 출력의 선풍기를 사용하여 풍력을 생성하였고 생성된 바람이 빠져나가기 위한 배기 장치, 정확한 풍속을 측정하기 위해 Lutron 사의 YK-80AM 풍속계를 사용하여 블레이드 위치에서 측정하였다. KBC 사의 6207 볼 베어링을 사용하여 마그네틱 베어링과 안정성 및 효율성 실험을 진행하였다.



Fig. 32 The final integrated small wind turbine system supported by two magnetic bearings and (b) the photography showing the operation test at 800 rpm



Fig. 33 Photographs showing (a) how to measure the wind speed and (b) the example of the test

3.1.1 안정성 실험 및 결과

□ 실험방법

마그네틱 베어링의 안정성을 검증하기 위해 풍속에 따른 진동수를 6207 베어링과 비교실험을 진행하였다. 베어링을 제외한 나머지 조건은 통제되어 같은 조건으로 실험이 진행되었고 진동 측정에는 GY-521 6축 가속도 센서가 사용되었다. 센서 위치의 경우 마그네틱 베어링 자체에는 물리적 접촉점이 없어 축과 물리적으로 닿게 되는 후면 지지대에 고정하였고, 6207 베어링의 경우 마그네틱 베어링의 측정 위치와 근사한 후륜 베어링 상단부에 고정하였다. Fig. 35는 실험 시작 시 5.5m/s의 풍속으로 회전되며 10초 회전 후 선풍기 정지와 함께 발생하는 진동을 측정하였다.



Fig. 34 Photographs showing two small wind turbine systems supported by (a) the designed magnetic bearings and (b) 6207 mechanical bearings for the comparative vibration test

🗌 결과

최고 회전수에 도달하는 10초에서는 마그네틱 베어링과 6207 베어링의 진동수는 큰 차이가 없으나 풍 속이 0m/s가 되는 15초에서 마그네틱 베어링의 진동이 발생하며 50초 뒤 정지, 6207 베어링은 서서히 진 동수가 낮아지며 10초 뒤 정지한다.

풍속이 낮아지기 시작하는 10초 이후부터 마그네틱 베어링의 진동수가 증가하지만 20초 후부터 진동 이 감소하며 6207 베어링보다 5배 긴 시간 회전 후 정지하였다. 진동 발생에 따른 발전 효율 하락이 발 생하겠지만, 마그네틱 베어링의 낮은 구름 저항성이 큰 이점이 된다. 진동과 구름 저항성에 따른 상관관 계를 검증하기 위해선 풍속에 따른 전압 측정을 통해 마그네틱 베어링의 효율성 입증을 진행한다.



Fig. 35 z-axis directional acceleration of the magnetic bearing and the mechanical bearing

3.1.2 전압 측정 실험 및 결과

마그네틱 베어링과 볼 베어링 간의 효율성 차이를 알아보기 위해 풍속에 따른 전압을 측정하였다. 두 베어링 모두 같은 발전기를 사용하였으며 실험 풍속은 1.5m/s ~ 5.5m/s이다. Fig. 36의 측정된 결과를 보 면 마그네틱 베어링의 발생 되는 전압이 6207 볼 베어링의 전압보다 모든 풍속에서 높다. 특히 마그네 틱 베어링은 1.5m/s에서 발전이 시작되지만 6207 베어링은 풍속이 2.1m/s일 때부터 발전이 시작된다. 저 속(2.5m/s)에서 자기 베어링 5.32V, 볼 베어링 2.143V로 약 2.5배 큰 전압을 생산하였으며 고속(5.5m/s)에 서 자기 베어링 10.49V, 볼 베어링 8.66V로 약 1.2배 큰 전압을 생산하였다. 마그네틱 베어링이 볼 베어 링보다 진동에 따른 발전 효율이 발생하겠지만 낮은 구름 저항성으로 효율성이 높은 것을 실험적으로 알 수 있다.

우리나라의 평균풍속 분포도를 참고하면 대부분 지역이 1~3m/s인 점을 고려할 때 낮은 풍속에서 발전 이 시작되는 마그네틱 베어링의 소형풍력발전기가 확실한 도심 속 풍력자원으로 사용될 수 있다는 점을 알 수 있다.⁽⁷⁾



Fig. 36 Voltage output comparison between using magnetic bearing vs. mechanical bearing unambiguously demonstrating the superiority of the magnetic bearing to improve the power output

3.2 활용방안 및 기대효과

□ 도심 속 친환경 에너지원으로 활용

대형풍력발전기와 달리 변속기가 없는 소형풍력발전기는 풍속에 따라 회전수가 증가하는데 고회전
 에 특화된 마그네틱 베어링을 접목함으로 높은 발전율을 기대할 수 있다.

저속에서 발전이 시작되는 마그네틱 베어링 풍력발전기는 도심 속 빌딩 옥상이나 가로등에 설치하
 여 가로등과 신호등에 필요한 전력을 생산하는 친환경 발전기로 사용될 수 있다.

마그네틱 베어링의 낮은 소음으로 기존 소형풍력발전기가 가지고 있는 소음 문제를 해결하여 주거
 지 주변 설치가 가능하다.

- 마그네틱 베어링은 윤활유가 필요 없고 특수 제작된 원자재가 없어 파손 시 신속한 수리가 가능하다.

□ 고회전, 저소음 소형 기계 시스템에서의 활용

- 모터, 플라이휠 에너지 저장 장치 등에 활용되어 마찰로 인한 손실 에너지를 최소화하여 더 높은 효율을 얻을 수 있다.

- 마그네틱 베어링은 접촉면이 없어 표면 손상이 일어나지 않고 반영구적인 사용이 가능하다.

- 고회전을 요구하는 기계장치에 부분적으로 사용하여 시스템 효율 향상이 가능하다.

3.3 시장성 분석 및 제작 단가

2021년 5월에 국회에서 기후 위기 대응 및 탄소중립 이행에 관한 기본법안을 발의했다. 2030년 감축 목표를 2017년 대비 50% 감축으로 명시하여 2050 탄소중립의 실제적인 실현과 국제사회 요구에 부응할 수 있는 감축경로를 명확히 하는 법안으로써 앞으로의 친환경 에너지의 중요성이 더욱 높아질 예정이 다.⁽⁸⁾ 그뿐만 아니라 9월에는 문재인 대통령이 태양광·풍력 설비를 2025년까지 두 배 이상 확대한다고 밝혀 풍력발전 시장은 가파르게 성장할 것으로 예상된다.⁽⁹⁾

2020년 서울에너지 포럼 '도시형 소형풍력발전기 기술 동향 및 확대 방안 토론'이 진행되었다. '도시형 소형풍력 확대 필요성'이 대두되었고 국내외 소형풍력 현황을 살펴보면 우리나라는 현재 소형풍력발전기 가 1,900대가 설치되어 있으며 전 세계 설치 순위 가운데 11위를 기록했다.⁽¹⁰⁾ 본 설계에 초소형 풍력발 전기도 도시의 낮은 풍속에 알맞은 풍력발전기로써 수요가 증가할 것으로 예상된다.

마그네틱 베어링을 접목한 소형풍력발전기의 마케팅 전략은 Step 1, Step 2로 나눌 수 있다.

Step 1	Step 2			
제품 보완 및 판매 준비	점유율 확대			
● 특허 출원 ● KS C IEC 61400 - 2 인증 획득 ● 베타 테스터 모집 후 요구사항 설문조사 ● 초기 판매	 정부와의 계약을 통한 공급망 확대 박람회, 포스터 등을 통한 제품 노출 지속적인 연구 개발을 통한 효율성 증대 			

Table 4 Magnetic Bearing Marketing Strategy

 구분	내역	개수	단가	금액(원)	비고
	자기 베어링 상단	2			3D printer 활용 자체제작
	자기 베어링 하단	2	3,8500	3,8500	(필라멘트 약
	지지대	1			1kg 사용)
원재료	M4 나사	12	40	480	
	알루미늄 중공축	1	14,000	14,000	
	N35 네오디뮴	64	2100	134,400	
	에나멜 동선	1	1	16,000	
	7	203,380			

Table 5 Cost of Magnetic Bearing

4. 결론

이번 설계의 목표는 '소형 기계 시스템을 위한 영구자석 자기 베어링의 개발'이다. 이번 설계의 차별 성은 크게 세 가지로 정리할 수 있다.

- 기존의 소형풍력발전기에 영구자석 마그네틱 베어링을 채택하여 마찰로 인한 에너지 손실을 크게 줄여 소형풍력 발전시스템의 효율성을 중대시켰다.
- 2. 국내 소형풍력발전기의 가격인 100만 원대인 점에 비교하여 마그네틱 베어링 소형풍력발전기의 단 가는 20만 원 이내로 제작할 수 있고 베어링의 마찰이 없어 반영구적 사용이 가능하다. 또한 특수 제작된 원자재가 없어 파손 시 수리가 쉽다.
- 시스템 전체의 구름 저항이 줄어 1~2m/s의 풍속에서도 전력생산이 가능해 우리나라의 평균풍속인 2~3m/s에 적합하여 도심, 가로수, 해변 등에 설치하면 자급자족 형태의 에너지를 얻을 수 있을 것 으로 기대된다.

위의 차별성을 바탕으로 지속적인 연구개발을 통한 다양한 크기의 베어링 제작, 화석연료 발전단가와 신재생에너지 발전단가가 같아지는 시기인 에너지 가격 균형점을 대비하여 탄소중립에 이바지하는 친환 경 에너지의 보급 및 다른 소형 기계 시스템에 다양하게 적용될 수 있을 것이다.

후 기

□이 논문을 작성하는 데 아낌없이 도움을 주신 김송길 교수님께 감사드립니다.
 □학문의 장을 펼치게 해주신 기계학회 관계자분들에게 감사의 인사를 드립니다.
 □본 공모전의 제품 제작에 지원비를 지원해주신 부산대학교 관계자분들에게 감사 인사를 드립니다.

참고문헌

- (1) SKF와 Schaeffler의 대표와 인터뷰, 베어링의 중요성이 점점 더 커지고 있다.
 https://mmkorea.net/2018/07/01/%EB%B2%A0%EC%96%B4%EB%A7%81%EC%9D%98-%EC%A4%91%EC%9
 A%94%EC%84%B1%EC%9D%B4-%EC%A0%90%EC%A0%90-%EB%8D%94-%EC%BB%A4%EC%A7%80%
 EA%B3%A0-%EC%9E%88%EB%8B%A4/
- (2) 2017 Small Wind World Report, WWEA June 2017
- (3) "소형풍력 넌 누구야?", 2017, 에너지 설비관리

http://www.energycenter.co.kr/news/articleView.html?idxno=356

- (4) "Generation Efficiency Characteristics of Small Wind Power for Green Energy Utilization", 2015, Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, pp. 489~494.
- (5) P. Samanta and H. Hirani, "Magnetic Bearing Configurations: Theoretical and Experimental Studies," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 2, pp. 292-300, Feb. 2008
- (6) Magnetic Calculator, https://www.kjmagnetics.com/calculator.asp
- (7) 계절별 최다풍향, 평균풍속 분포도, 기상청, http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/wdws/wvs
- (8) 이수진 의원(비례), 기후위기 대응·탄소중립 기본법 발의,
- http://www.energydaily.co.kr/news/articleView.html?idxno=119325
- (9) 문 대통령 "태양광·풍력 설비, 2025년까지 두 배 이상 확대"
- https://news.sbs.co.kr/news/endPage.do?news_id=N1006457012&plink=ORI&cooper=NAVER
- (10) 2020 서울에너지포럼 2 도시형 소형풍력발전 기술동향 및 확대 방안,
- http://energytransitionkorea.org/post/37314