



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

소형풍력발전기를 위한 시뮬레이터 개발에 관한 연구

指導教授 邊 基 植

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2017年 2月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

制 御 計 測 工 學 科

朴 元 鉉

朴元鉉의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2017年 02月



主 審 工學博士 安 永 珠



委 員 工學博士 金 萬 高



委 員 工學博士 邊 基 植



목 차

목차	i
Abstract	iii
제 1 장 서론	
1.1 연구 배경 및 목적	1
제 2 장 풍력발전 시스템	
2.1 풍력 발전기의 원리 및 구성	5
2.2 풍력에너지의 특성	8
2.3 풍력 블레이드 출력 특성	10
2.3.1 공기역학적 이론	11
2.3.2 주속비	13
2.3.3 솔리디티	15
2.3.3 출력계수	15
2.4 풍력발전기 충전 시스템	17
2.4.1 강압형 컨버터의 구성 및 동작	18
2.4.2 강압형 컨버터를 이용한 최대전력점 추종(MPPT)제어	20
제 3 장 풍력발전기 시뮬레이터 구성	
3.1 시뮬레이터 구성	22
3.2 마이크로 컨트롤러	23
3.3 충/방전 하드웨어 설계	24
3.3.1 정류기(Rectifier)	25
3.3.2 강압형(Buck) 컨버터	27

3.3.3 포토커플러를 이용한 RPM계측	28
3.4 풍력 시뮬레이션 알고리즘	32
3.4.1 풍속별 블레이드 동작특성 모델링 및 시뮬레이션	32
3.4.2 풍속별 블레이드 회전력 모터제어 알고리즘	37
3.4.3 최대 출력점 추종(MPPT)제어 알고리즘	42
 제 4 장 풍력발전 시뮬레이터 실험 및 결과	
4.1 실험 구성	44
4.2 풍력발전 시뮬레이터 실험	45
4.2.1 시뮬레이터 제어에 의한 발전량 측정	48
4.2.2 풍동실험에 의한 발전량 측정	51
 제 5 장 결론	55
 참고문헌	56
 감사의 글	58

A Study on Development of Simulator for Small Wind

Power Generator

Won-Hyeon Park

Department of Control & Instrumentation Engineering

Graduate School of

Pukyong National University

Abstract

As the Paris Agreement takes into effect, the reduction of greenhouse gas emissions is mandatory. It would be inevitable to develop and apply new and renewable energies which are one of the best ways to replace fossil fuels in order to reduce emissions. Most of all, wind power generator produces electricity by converting wind power to energy, drawing much attention as one of new and renewable energies after the Paris Agreement's conclusion.

Above the rest, small wind power generation system is highly regarded for its handy installation, so various forms of blades and towers are being produced in the light of balance with the surroundings. There had been wind tunnel experiments with similar environment to the actual wind power by embodying wind power generation system. However, it had been costly and limited in time and space. Therefore, this paper means to draw the similar result to the actual wind tunnel experiment by producing a wind power

generation simulator. The simulator is composed of induction motor, generator, inverter, battery controller and battery. Since the rotation speed of the wind power generator blade is variable in response to counter electro-motive force of the battery and the generator, Matlab-Simulink is used for the simulation in order to figure out the behavior properties of helical blade for this paper. Motor control algorithm and maximum power point tracking(MPPT) control algorithm are developed for the motor to control behavior properties derived from the simulation. In doing so, this paper has compared energy production from generator according to the rotation speed of each blade, with energy production from actual wind tunnel experiment. The result shows the similar conclusions with a 5 percent margin of error.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 파리기후협정 발효로 인해 전 세계적으로 온실가스 감축이 의무화되었다. 온실가스 감축을 위해서는 기존의 화석연료를 대체할 만한 대표적인 에너지원으로 손꼽히는 신재생에너지 개발·보급이 불가피할 전망이다. ‘신재생에너지’는 신(新)에너지와 재생(再生)에너지의 합성어로 기존의 화석 연료를 재활용하거나 재생 가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지를 의미하며, 특정지역에만 분포하고 자원의 양이 한정된 화석연료와 달리 재생이 가능하기 때문에 고갈되지 않고, 오염물질이나 이산화탄소 배출량이 적어 환경문제를 유발하지 않는 장점이 있다. 이 가운데 보급이 대중화된 대표적인 신재생에너지로는 태양광발전과 풍력발전이 있다. 그 중에서 풍력발전은 바람의 힘을 에너지로 변환시켜 전기를 생산하는 발전 기술이며 파리기후협정 발효로 주목받는 신재생에너지 중 하나이다. 그림 1.1은 태양광발전과 풍력발전의 시장동향이다. 파리기후협정 이후 2040년에는 약10배 이상의 발전용량이 증가하는 것으로 보인다. 미국과 유럽 등에서는 많은 수의 풍력발전기를 설치하여 화석에너지의 일부를 대체하고 있고, 대규모의 상업용 발전기와 더불어 가정단위의 소용량 소형 풍력발전시스템에 대한 기술 개발과 투자가 활발하게 이루어지고 있다. 소형 풍력발전시스템은 대형 풍력발전시스템의 단점인 설치 시 환경문제를 일으키지 않으며, 소음이 작아 사람이 거주하는 주거 공간 및 주변 공간에 설치 가능한 장점을 가지고 있다. 주요 설치 장소는 아파트 단지나 빌딩의 옥상, 학교, 공장 건물, 교량, 고속도로 , 광고탑, 가로등, 공원 주변 등 거

의 모든 지역에 설치 가능하다. 표1.1은 소형풍력발전기 전 세계 연간 설치 용량 전망이고, 표1.2는 소형풍력발전기 시장 규모 전망이다[1][2].

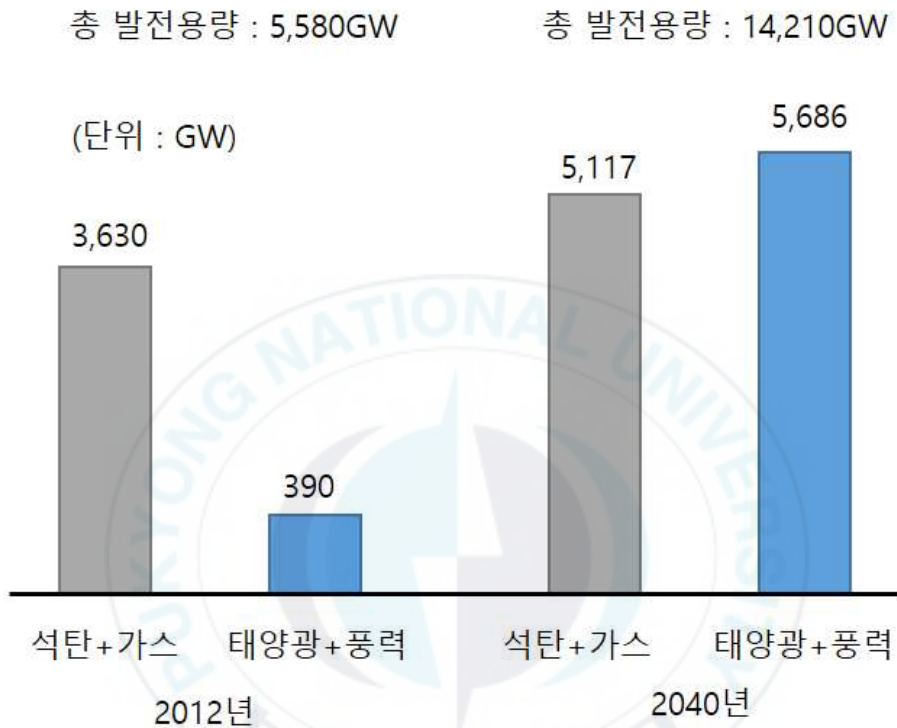


그림 1.1 태양광과 풍력시장의 전망[3]

표 1.1 소형풍력발전기 전 세계연간 설치 용량 전망[4] (단위 : MW)

연도	2009	2011	2013	2015	2020
연간 설치 용량	49	75	115	288	750

표 1.2 소형풍력발전기 시장 규모 전망[5]

(단위 : 만 달러)

연도	2009	2011	2013	2015
세계 시장	20,300	29,000	41,200	60,000
국내 시장	812	1,450	2,266	3,600
국내 점유율	4.0%	5.05	5.5%	6.0%

최근, 소형풍력발전시스템은 설치가 용이하다는 장점으로 주위의 환경과 조화를 고려하여 여러 가지 형태의 블레이드와 타워들이 제작되고 있다. 본 연구에서 사용하는 블레이드는 그림1.2와 같이 헬리컬 블레이드이며 기존 나무의 개념을 새롭게 풍력블레이드에 적용하여 재해석한 풍력나무이다.

기존에는 풍력발전시스템을 구현하여, 풍동실험을 하기 위해 실제 풍력과 유사한 환경을 구성하여 풍동실험을 하였다. 하지만, 이러한 풍동실험을 구성하기에는 비용적인 문제가 많이 들고, 공간의 제약을 많이 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 모터와 발전기를 이용한 테스트베드를 구성하고 풍속에 따라 가변 하는 블레이드의 동작특성을 모터로 묘사하여, 실제 풍동실험과 유사한 결과를 도출하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 풍력발전시스템에 대한 원리 및 구조 그리고 블레이드의 동작특성에 대해 기술하고, 3장에서는 본 연구에서 사용하는 풍력 시뮬레이터의 시스템 구성 및 2장의 내용을 기반으로 블레이드 동작특성을 모델링하고 시뮬레이션을 하며, 모터제어 알고리즘 및 최대전력점추종(MPPT)알고리즘을 제시 한다. 4장은 이를 바탕으로 모터제어 알고리즘을 적용한 풍력발전 시뮬레이터 데이터와 실제 풍동실험장에서 얻은 데이터를 비교하며, 5장에서는 결론을 제시한다.



그림 1.2 헬리컬 블레이드를 이용한 풍력나무

제 2 장 풍력발전 시스템

2.1 풍력 발전기 원리 및 구성

풍력발전이란 그림2.1과 같이 공기역학적(Aerodynamic)특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고 이 기계적 에너지로 발전기를 회전시켜 전기를 얻는 기술이다.

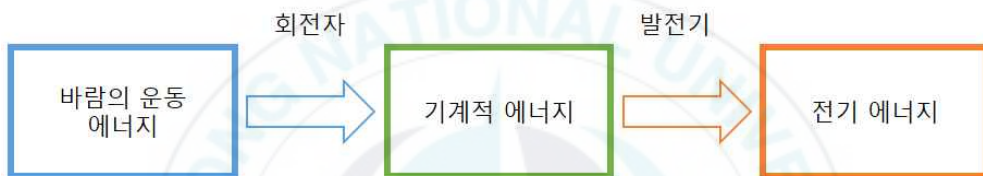


그림 2.1 에너지 변환

풍력 발전기는 지면에 대한 회전축의 방향에 따라 수평형 및 수직 형으로 분류되고, 주요 구성 요소로는 그림2.2와 같이 날개(Blade)와 허브(Hub)로 구성된 회전자와 회전을 증속하여 발전기를 구동시키는 증속 장치(Gear Box), 발전기 및 각종 안전장치를 제어하는 제어 장치, 유압 브레이크 장치와 전력 제어 장치 및 철탑 등으로 구성된다[1][6].

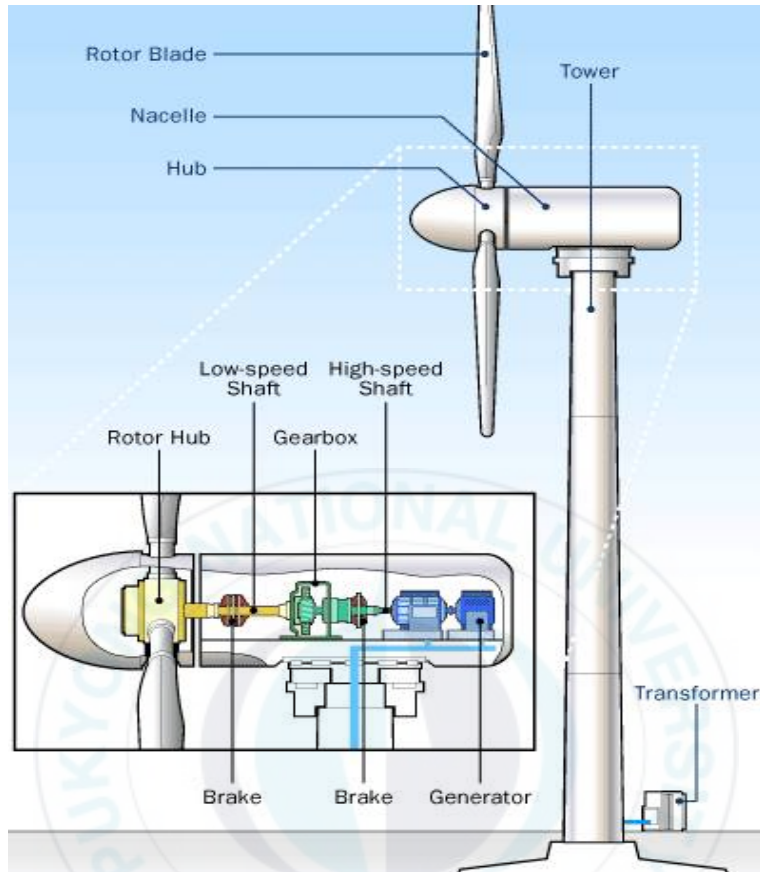


그림2.2 풍력발전기 구조

풍력발전기의 날개를 돌게 하는 것은 그림2.3과 같이 풍향에 수직인 양력, 즉 위쪽 방향으로 잡아당기는 힘이 발생하기 때문이다. 양력은 바람이 불 때 날개의 윗면에 흐르는 공기가 밑면보다 더 빨리 움직이기 때문에 날개 윗면의 압력이 아래 면보다 낮아지면서 발생하게 된다. 또한, 날개의 바람에 대한 각도가 점점 커지면 날개의 양력(Lift Force)도 증가하게 된다.

양력과는 다르게 풍향과 같은 방향으로 발생하는 힘은 공기역학적 기술 용어로 항력(Drag Force)이라고 하며, 항력은 보통 운동방향에 닿는 면적

이 커질수록 증가하게 된다. 양력은 풍력발전기의 하중을 증가시키는 요인이 되는데, 회전날개를 개발할 때에는 양력을 최대한으로 하고, 항력을 최소화하는 것이 가장 중요한 목표가 된다. 그러나 어느 각도 이상으로 되면 날개 윗면을 흐르던 공기는 갑자기 날개 표면에서 떨어지고 불규칙적인 소용돌이 속에서 회전하게 되면서, 발생하는 양력이 갑자기 사라지게 되는 실속(Stall) 현상이 발생하게 된다.

풍력발전기는 전력 제어를 위해 이 실속현상을 이용하기도 한다. 전력 제어(Power Control)란 강한 바람에서 풍력 발전기에 발생하는 충격을 최소화하기 위해서 설계범위 이상의 바람 에너지는 흘려버리는 것으로, 모든 풍력 발전기에 이 전력 제어를 하고 있다.



그림2.3 블레이드에 작용하는 양력과 항력

- * 항력(Drag Force) : 물체의 운동을 방해하는 방향으로 작용.
- * 양력(Lift Force) : 유동방향에 수직하게 연직 상향으로 작용하는 힘.
- * 실속(Stall) : 양력이 감소하고, 항력이 증가하여 비행을 유지하지 못하는 형상.

2.2 풍력에너지의 특성

바람은 눈에 보이지 않는 공기의 흐름으로, 이 공기의 흐름이 가진 에너지는 운동에너지이다. 일반적으로 물리학에서는 질량(m), 속도(v)를 가진 물질의 운동 에너지를 E 로 표현하면 아래의 식(2.1)과 같다[7][8].

$$E = \frac{1}{2}mv^2 [J] \quad (2.1)$$

수풍 면적 혹은 블레이드 회전면적(Swept Area) $A[m^2]$ 의 풍차를 생각하면 이 면적을 단위시간당 통과하는 바람의 체적은 풍속과 면적의 곱이 된다.

질량은 체적과 밀도의 곱이므로, 단위 시간당 면적을 통과하는 바람의 질량, 즉 질량유량(Mass Flow Rate) $\dot{m}$ 은 다음의 식과 같이 공기 밀도 ρ , 면적 A , 풍속 v 의 함수로 표현된다.

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho Av \quad (2.2)$$

동력(Power)은 시간에 대한 에너지의 비이므로, 바람으로부터 면적 A 를 통과 시 얻을 수 있는 출력 P_o 는 다음의 식과 같다.

$$P_o = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}mv^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 [W] \quad (2.3)$$

따라서 식(2.3)에 식(2.2)을 대입하면 바람의 최대 출력은 식(2.4)와 같다.

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ [W]} \quad (2.4)$$

여기서, P_o 는 출력[W], ρ 는 공기밀도[kg/m³], A는 블레이드 회전면적[m²] 그리고 v 는 풍속[m/s]이다.

식(2.4)는 자유 유동의 공기흐름에서 에너지 변환장치에 의하여 얼마나 기계적 에너지를 얻을 수 있는지를 나타낸다. 바람이 블레이드에 전달하는 에너지량은 공기의 밀도, 블레이드회전면적 그리고 풍속에 따라 좌우된다. 출력은 블레이드의 회전면적에 비례하고, 풍속의 세제곱에 비례함을 알 수 있다. 만약 풍속이 2배 이면 2의 3제곱, 즉 8배의 에너지를 가진다.

움직이는 물체의 운동에너지는 물체의 질량에 비례한다. 따라서 바람의 운동에너지는 공기의 밀도(air density), 즉 단위체적당 질량에 의존한다. 공기가 무거울수록 블레이드에 의해 더 많은 에너지가 흡수된다. 공기밀도는 위치, 계절, 온도, 습도에 따라 변한다. 밀도는 습도가 증가함에 따라 약간씩 감소하고, 또한 공기는 더울 때보다 차가울 때 밀도가 더 높으며, 고도가 높아지면 기압은 낮아지고 공기는 더 희박하게 된다. 일반적으로 표준 대기압과 온도 15° [C] 에서 공기의 밀도는 1.225[kg/m³]이다[1][6].

블레이드 회전면적(swept area)은 풍력발전기가 바람으로부터 얼마나 많은 에너지를 거두어들일 수 있는 지를 결정한다. 블레이드 면적은 블레이드 직경의 제곱으로 증가하기 때문에 크기가 2배인 블레이드는 4배 많은 에너지를 받아들인다.

2.3 풍력 블레이드 출력 특성

풍력발전은 초기의 다양한 실험과 개발을 통해서 현재 매우 다양한 방식의 블레이드가 개발되고 있다.

표2.1 블레이드의 종류

분류기준	형 식
회전축방향	수평축 풍력발전시스템(프로펠러형)
	수직축 풍력발전시스템(다리우스형, 자이로밀형, 헬리컬형, 사보니우스형)
공력이용방식	양력방식(lift types)
	항력방식(drag types)



그림 2.4 수평축 풍력발전기



그림 2.5 수직축 풍력발전기

풍력발전기는 회전축 방향에 따라 분류하면 그림2.4와 2.5같이 수평축과 수직축으로 나눌 수 있다. 즉, 바람이 불어오는 방향에 대하여 로터의 회전축이 평행하게 놓이는 것을 수평축, 수직으로 설치되는 것이 수직축이다.

풍력발전용을 중심으로 가장 많이 이용되고 있는 것은 프로펠러형 수평축 풍력발전기이다.

2.3.1 공기역학적 이론

바람은 공기의 흐름이므로 바람이 갖는 에너지는 운동에너지이다. 블레이드 회전면을 통과하는 바람이 가진 에너지를 모두 추출해 내는 것은 풍력 블레이드 후방의 흐름이 완전히 정지하는 것을 의미하는데 이는 실제로 일어 날 수 있는 상황은 아니다[6].

블레이드가 움직일 수 있는 기계적 에너지는 바람이 가지고 있는 운동

에너지를 사용해야만 얻을 수 있다. 질량은 일정하게 유지되므로 에너지 보존의 법칙(law of conservation of energy)에 의하여 블레이드 회전반경 뒤쪽의 유속은 감소되어야 하며, 유속이 느려지는 것은 동일한 질량이 블레이드를 지나야하므로 단면이 커진다는 뜻이다. 이를 도식적으로 나타내면 그림 2.6와 같다.

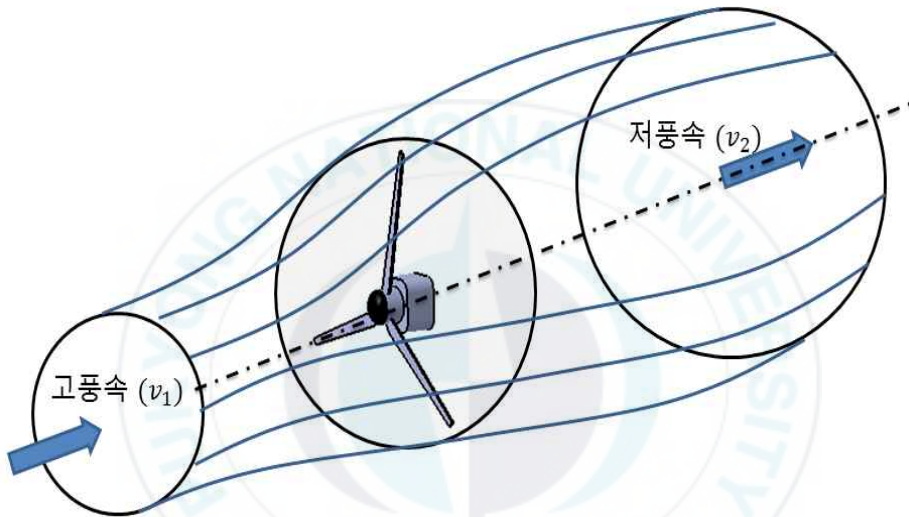


그림 2.6 풍력터빈 바람의 유동장

이 기계적 에너지는 공기 덩어리의 흐름이 블레이드 회전반경의 전과 후의 출력의 차이로 나타난다. 이에 연속방정식(continuity equation)과 운동량 보존의 법칙(law of conservation of momentum)을 도입하여 블레이드의 기계적 출력을 식(2.5)로 나타낼 수 있다[7].

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (2.5)$$

여기서 v_1 은 공기질량이 블레이드를 지나기 전의 속도, v_2 는 지난 후의 속도이다.

블레이드에 의하여 추출된 기계적 출력과 초기의 입력된 기계적 에너지의 비를 출력계수(power coefficient) C_p 라 하고 식(2.7)와 같이 표시한다 [7].

$$C_p = \frac{P}{P_o} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3} \quad (2.7)$$

여기서 C_p 는 오직 풍속 v_1 과 v_2 만의 함수로 나타난다. 식(2.7)를 좀 더 간추려서 $\frac{v_2}{v_1}$ 의 함수로 나타내면 최대치를 갖는 곡선을 나타낸다. 이 최대치는 $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ 에 발생하며 그 때의 C_p 는 0.593이다. 이를 이론 출력계수라 하고 독일의 A. Betz가 증명하여 베츠계수(Betz factor 또는 Betz limit)라고도 한다.

2.3.2 주속비

풍력발전기의 블레이드 주속비는 블레이드가 회전할 때 블레이드 끝 지점이 움직이는 속도이다. 이 속도는 풍력발전의 블레이드를 설명하는데 많이 고려되는 요소이다. 주속비는 블레이드의 길이가 증가함에 따라 선속도가 증가하여, 일정속도를 초과하면 소음발생과 관련되기 때문에 중요하게 취급한다[8].

풍력발전기의 블레이드 선단속도와 풍속의 비로 정의되는 값을 주속비 (TSR, λ , tip speed ratio), 선단속도비, 깃끝속도비 등으로 부르고, 식으로 표현하면 다음 식(2.8)과 같다.

$$\lambda = \frac{\text{blade tip speed}}{\text{wind speed}} = \frac{\omega R}{v} = \frac{2\pi n R}{v} \quad (2.8)$$

여기서 ω 는 각속도[rad/sec], R은 블레이드의 반경[m], n은 블레이드 회전수[rpm] 이다.

그림2.7은 주속비에 따른 출력계수 곡선으로 풍속이 변화함에 따라 출력 계수 또한 변화하게 되는데, 항상 최대 출력계수가 되도록 유지하기 위해서는 최적의 주속비를 유지시켜야한다. 이로 인해, 바람이 가지는 운동에너지가 블레이드의 기계적 에너지로 변환되는 효율이 최대가 된다.

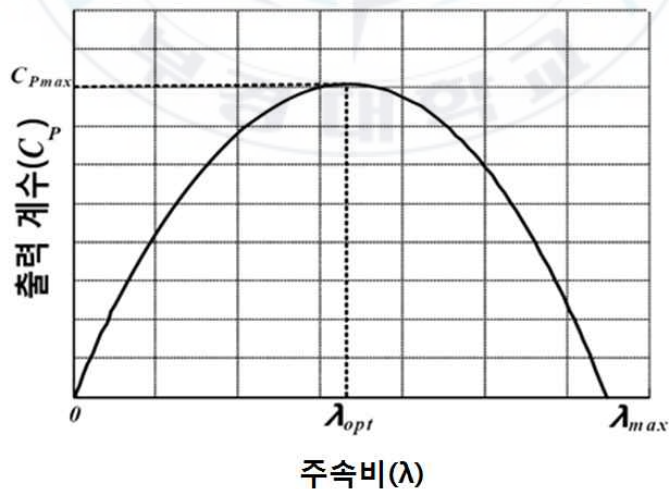


그림 2.7 주속비에 따른 출력 계수 곡선

2.3.2 솔리디티

풍력발전기의 성능을 특징짓는 또 하나의 중요한 특성계수로 솔리디티 (solidity) σ 가 있다. 솔리디티는 풍력터빈의 로터회전면적에 대한 로터블레이드의 전 투영면적의 비로 정의된다. 단, 여기서 투영면적은 풍력터빈 회전축에 수직인 면으로의 투영을 의미한다. 그리고 주속비는 솔리디티와 밀접한 상관관계가 있다.

수평축형 풍력발전기에서는 날개 매수가 많은 미국 다익형 프로펠러형보다 솔리디티가 크고, 토크가 커서 양수용 펌프를 돌리기에 적합하다. 수직축형 풍력발전기에서는 사보니우스형이 다리우스형보다 솔리디티가 크다. 솔리디티를 식으로 나타내면 식(2.9)및 식(2.10)와 같다[8].

수평축의 경우

$$\sigma = \frac{BS}{\pi R^2} \quad (2.9)$$

수직축의 경우

$$\sigma = \frac{BC}{2\pi R} \quad (2.10)$$

여기서 R은 블레이드 반경, S는 수평축 블레이드 투영면적, B는 블레이드 매수, C는 수직축에 블레이드의 코드길이를 나타낸다.

2.3.4 출력 계수

이론적으로 이용이 가능한 출력은 이미 식(2.4)에 나타내었다. 하지만 블레이드로 이 모든 출력을 추출해 낼 수는 없고 공기의 흐름이 블레이드를 지날 때 운동에너지의 일부분만 블레이드에 전달된다. 블레이드에 의해 생산되는 실제 출력은 바람에서 블레이드로 에너지 전달효율로 결정된다. 따라서 블레이드를 이용해 바람으로부터 추출해 낼 수 있는 출력의 비율을 출력계수 C_p (power coefficient)라고 하고, 식(2.7)에서 이미 정의하였다. 하지만, 소형 풍력발전기 같은 경우 풍속계가 설치되지 않으므로 실시간으로 풍속데이터를 얻을 수 없다. 따라서 출력계수를 식(2.11)으로 표현하여 구할 수 있다[8].

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \theta - c_4 \right) e^{-c_5 \lambda_i} + c_6 \lambda \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08} - \frac{c1}{\theta^3 + 1} \quad (2.12)$$

이때 $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ 는 형상계수, θ 는 피치각, λ 는 주속비이다.

출력계수는 풍력터빈의 효율을 평가하는 가장 중요한 인자로서 최대로 얻을 수 있는 출력계수의 값은 베츠계수(Betz factor 또는 Betz limit)라고도 알려져 있다. 이론적으로 최대 출력계수 값은 0.593이지만, 그림2.8에서 보는 바와 같이 고성능 프로펠러형 풍력터빈이 0.45 ~ 0.48이고, 항력형 사보니우스 풍력터빈이 0.15 ~ 0.20 정도이다.

그림2.8은 각 풍력발전기의 주속비에 따른 로터의 출력계수를 나타낸 그래프이며, 주속비가 낮을수록 저속-고토크 출력, 높을수록 고속-저토크 출력 특성을 갖는다. 또한, 낮은 주속비를 갖는 블레이드 일수록 이용

가능한 주속비 구간이 좁게 나타나고, 반대로 높으면 넓은 주속비 범위를 갖는다. 주속비가 낮을 경우에는 출력의 변화량이 크더라도 속도 변화량이 적기 때문에 발전기 역기전력의 변화량이 작지만, 주속비가 높을 경우 출력 변화량에 대해 속도의 변화량이 크기 때문에 발전기 역기전력 변화 폭이 넓게 된다.

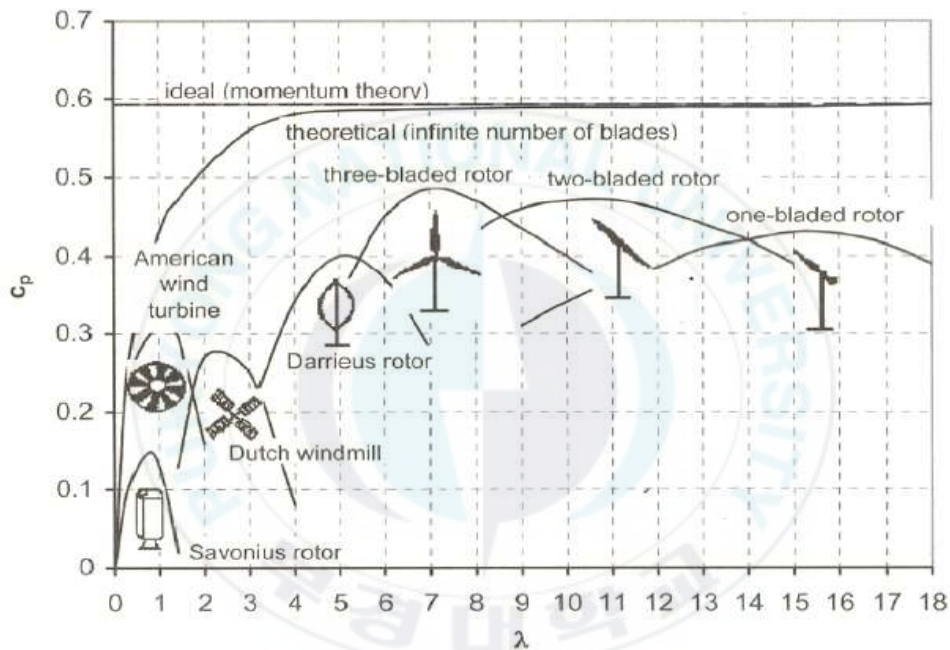


그림 2.8 다양한 풍력발전기의 주속비에 대한 로터의 출력계수

2.4 풍력발전기 충전 시스템

본 논문에서 사용하는 소형풍력발전 시스템은, 일반적으로 수[KW]급 이하의 작은 용량을 가지는 시스템으로, 블레이드, 발전기, 제어기, 축전지, 타워 등으로 구성되어있다. 일반적으로 소형풍력발전에서는 계통 연계

형 보다 독립형 풍력발전기를 많이 사용을 한다. 독립형 소형풍력발전기는 그림2.9와 같이 크게 블레이드, 발전기, 제어기와 배터리로 구성되어 있으며, 발전기의 특성에 따라 Buck Converter 또는 Boost Converter를 사용한다. 본 논문에서는 발전기의 전압이 비교적 높기 때문에 강압형인 Buck Converter를 사용하였다.

다이오드 정류기는 회로구성이 간단하고 별개의 제어기를 구성할 필요가 없어 가격이 저렴하다는 장점과 함께 제어기의 잘못된 스위칭 동작으로 인한 사고 위험이 없는 장점이 있어, 지금까지 산업계에서는 직류전원을 얻기 위한 방식으로 비제어 다이오드 정류기가 많이 사용되고 있다.

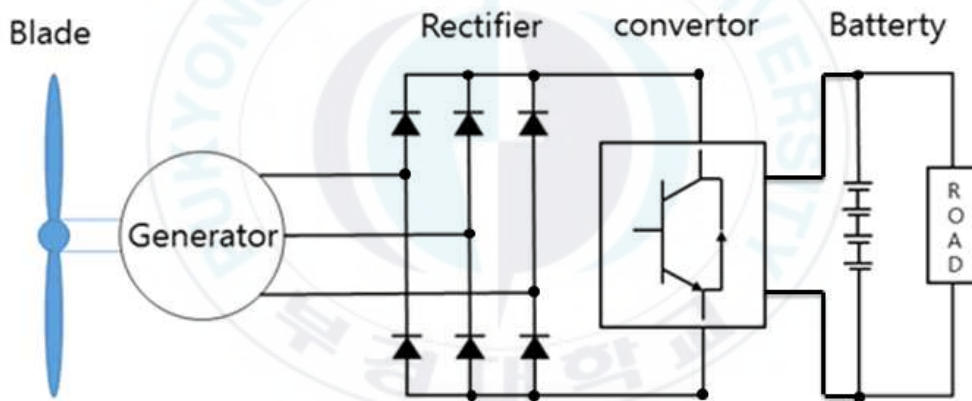


그림 2.9 독립형 소형풍력발전기 시스템 구성도

2.4.1 강압형 컨버터의 구성 및 동작

DC/DC buck 컨버터는 높은 입력 전압을 낮은 출력 전압으로 낮춰주는 강압(step-down)형 컨버터이며, 구성이 간단하고 제작비용이 저렴하여 산업체에 널리 사용 되고 있다. 또한 제어 측면에서도 하나의 스위치만으로 전압 강압을 제어 가능하므로 간단하고 쉬운 제어 측에 속한다. 일반

적으로 배터리 충전을 목적으로 하는 소형풍력발전시스템의 경우 발전기의 출력 전압이 배터리의 전압보다 높게 된다. 그래서 안전한 배터리 충전을 위해서는 높은 발전기의 출력 전압을 배터리 충전이 가능한 낮은 전압으로 강압을 시켜주는 시스템이 필요한데 강압형 컨버터가 소형풍력발전시스템에 널리 사용되고 있다. 강압형 컨버터의 구성은 입력 역할을 하는 직류 전원과 직류 전원을 신호 처리하는 스위치(Q)와 환류다이오드(D_m), 그리고 출력 전압에 방해되는 리플 성분을 제거하기 위한 필터 역할을 하는 인덕터(L)와 커패시터(C)로 구성된다. 아래의 그림2.10은 강압형 컨버터의 회로도이다[10][11].

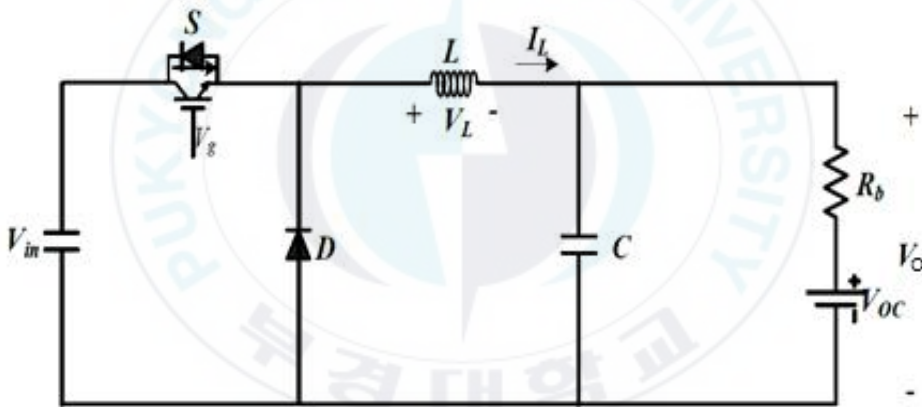


그림 2.10 강압형 컨버터의 구성 회로도

강압형 컨버터는 시비율이라고 하는 D(Duty ratio)값을 통하여 입력전압에 대한 출력전압의 비를 제어 할 수 있다.

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (2.13)$$

2.4.2 강압형 컨버터를 이용한 최대 전력점추종(MPPT)제어

독립형 소형풍력발전시스템의 경우 그림 2.10과같이 부하에 배터리를 연결하여 충전하게 된다. 소형풍력발전시스템의 부하로 배터리가 부착될 경우 풍속에 따라 블레이드가 회전을 할 때 발전기에서 출력된 전력이 배터리로 충전된다. 하지만, 강압형 컨버터의 듀티비 조절을 통해, 즉 배터리 공급전력을 조절함에 따라 부하가 증가하게 되면 발전기로부터 역기전력이 증가되어 블레이드의 회전수가 낮아지게 되어 발전기에서의 출력되는 전압이 낮아져 배터리에 공급되는 전력이 낮아지게 된다. 따라서 이러한 충전 제어를 하기 위해 일반적으로 최대 전력점(MPPT)제어 구현하여 항상 최대전력이 배터리에 공급되도록 조절한다.

강압형 컨버터의 입력과 출력 전압 관계식인 식(2.23)을 듀티비에 대한 미분 식으로 나타내면 식(2.24)과 같다.

$$\frac{dD}{dV_i} = -\frac{V_o}{V_i^2} \neq 0 \quad (2.24)$$

발전기 최대 전력점에서 발전기 전력과 속도의 관계는 식(2.25)와 같다.

$$\frac{dP}{d\omega_{blade}} = 0 \quad (2.25)$$

식(2.25)을 식(2.26)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dP}{d\omega_{blade}} = \frac{dP}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_i} \cdot \frac{dV_i}{d\omega_{blade}} = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{dV_i}{d\omega_{blade}} > 0 \quad (2.27)$$

여기서 P 는 발전기의 전력을 의미하며, ω_{blade} 는 블레이드의 회전속도를 의미한다. 식(2.26)에서 식(2.24)와 식(3.27)을 대입하고 정리하여 식(2.28)의 관계식을 구할 수 있다. 이를 통해 강압형 컨버터의 듀티비 조절을 통해 발전기의 회전속도와 최대전력점 추종제어가 가능하다는 것을 알 수 있다[12][13].

$$\frac{dP}{d\omega_{blade}} = \frac{dP}{dD} = 0 \quad (2.28)$$

그림2.11은 강압형 컨버터의 최대전력점 추종과정을 나타낸 것으로, 전력과 회전속도가 증가하는 경우에는 듀티비를 증가시켜 발전전력이 최대 전력점에 도달되도록 하고, 반대로 전력이 감소하고 회전속도가 증가하게 되는 경우에는 듀티비를 감소시켜 발전전력이 최대전력점에 도달한다.[12][13]

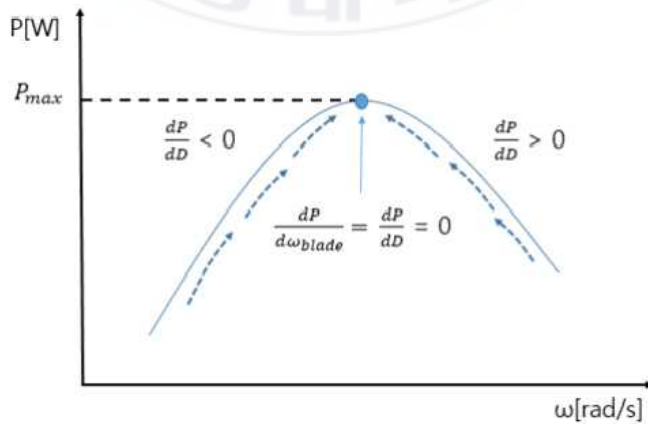


그림2.11 최대전력점(MPPT) 추종 과정

제 3 장 풍력발전기 시뮬레이터 구성

3.1 시뮬레이터 구성

본 연구에서 배터리를 충전하기 위해 발전기와 충전제어기를 연결하여 충전 제어를 하고, 실제풍속에 따른 블레이드의 회전력을 모터로 구현한다. 하드웨어 구성은 인버터, 인덕션모터, 발전기, 충전제어기, 배터리, 센서로 이루어진다. 시스템 전체 구성도는 그림3.1과 같고 풍속에 따른 블레이드 모델링을 통해 시뮬레이션 한 결과를 이용하여 인버터로 모터를 제어한다.



그림 3.1 시스템 전체 구성도

3.2 마이크로 컨트롤러

본 연구에서는 DC-DC Buck Convertor의 전압 조절을 위한 PWM신호의 발생 그리고 MOSFET 구동, 전압-전류-RPM 측정, 알고리즘을 구현하기 위해 Arduino Mega2560을 사용하였으며, 표 3.1은 Arduino MEGA 사양표이다.

표 3.1 Arduino MEGA 사양표

	Microcontroller	ATmega2560
	Operating Voltage	5V
	Input Voltage	7~12V
	Input Voltage(limits)	6~20V
	Digital I/O Pins	54
	Analog Input Pins	16
	Flash Memory	256KB
	SRAM	8KB
	EEPROM	4KB
	Clock Speed	16MHz

Arduino MEGA 2560의 경우 기본적으로 PWM의 스위칭 주파수가 490Hz로 낮기 때문에 사용하는 PWM핀의 타이머 레지스터 값을 변경하여 7.8Khz의 스위칭 주파수를 갖도록 하였다.

3.3 충/방전 제어기 하드웨어 설계

발전기로부터 출력되는 전력을 배터리로 충전을 하기 위해서는 충전제어가 필요하다. 배터리를 충전하기 위해서는 충전조건에 따라 공급전력 제어를 하여야 함으로 충전제어가 필요하고, 또한 풍속에 따라 블레이드의 회전속도가 가변적이기 때문에 항상 최대 출력을 유지할 수 있도록 듀티비를 조절을 통한 MPPT제어가 필요하다. 그림3.2는 충전제어기의 회로도이다.

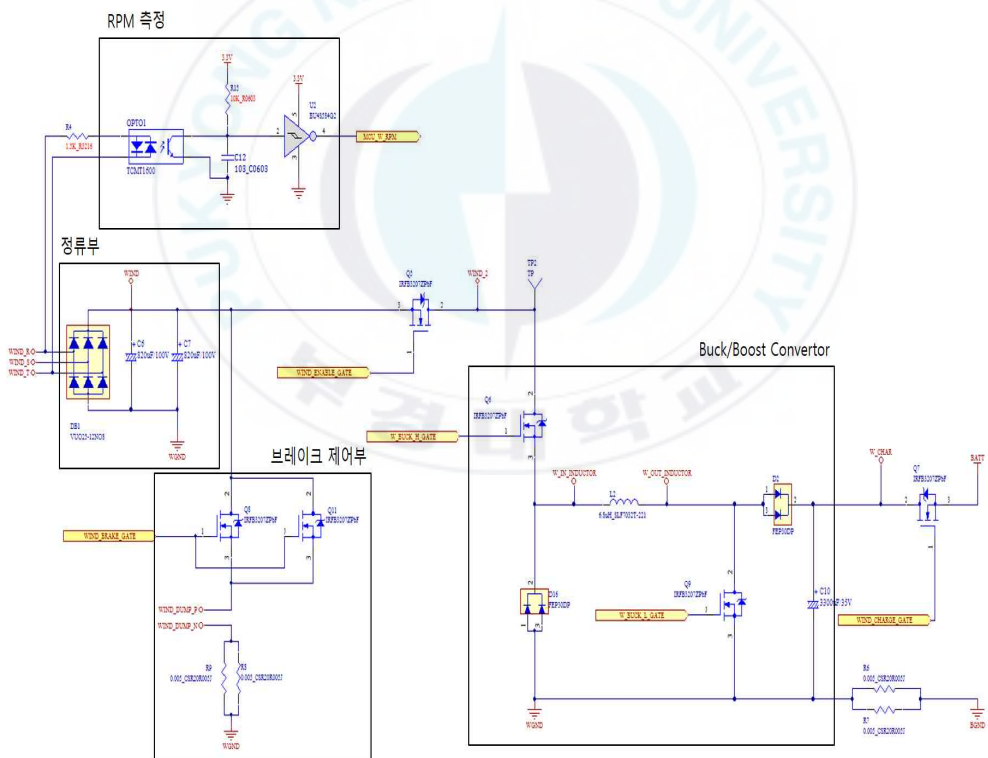


그림 3.2 충전제어기 회로도

3.3.1 정류기(Rectifier)

정류기는 교류를 직류로 바꾸기 위한 전기적 장치라고 말한다. 그림 3.3은 3상 교류 정류 회로 이다. 6개의 다이오드를 브리지 모양으로 연결하여 3상 교류 발전기의 출력 단자에 접속한 것인데, 교류 발전기는 이 방식으로 3상 교류를 정류한다. 이 방식은 정류된 전압은 맥동이 대단히 적은 직류가 얻어 진다.

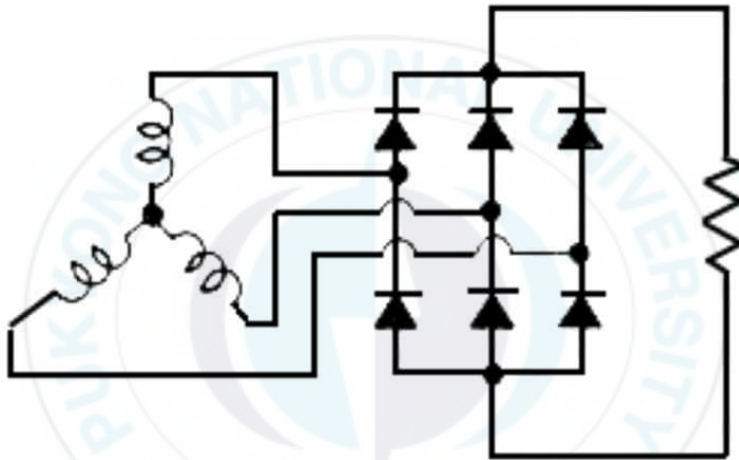


그림 3.3 3상 교류 정류 회로

3상 전압으로부터 정류기를 거쳐 얻어지는 평균 출력 전압은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{dc} &= \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3} V_m \cos \omega t d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1.1654 V_m
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

그림3.4는 발전기로부터 출력되는 3상전압 파형이며, 그림3.5는 정류된 직류 파형이다.

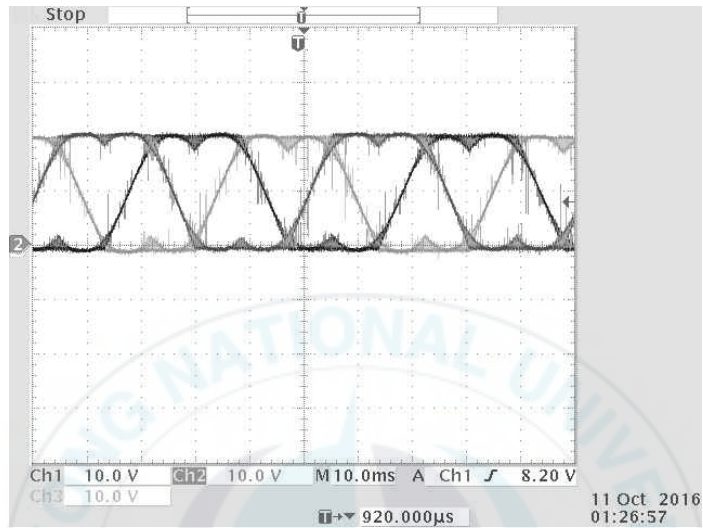


그림 3.4 발전기 출력 3상전압

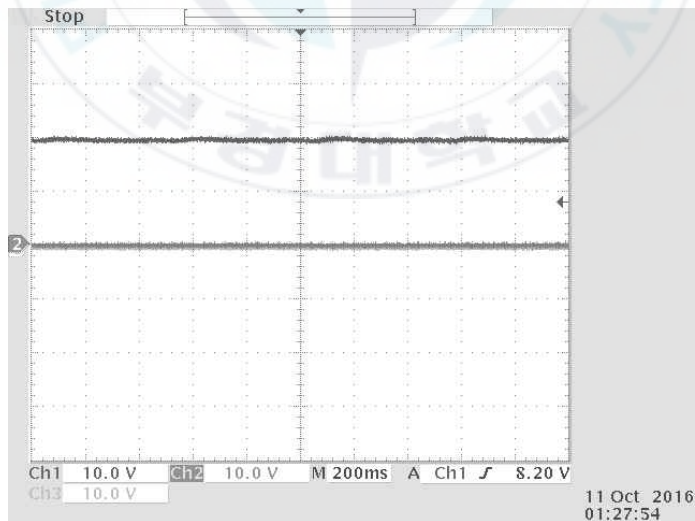


그림 3.5 정류된 DC전압

3.3.2 강압형 컨버터(Buck Converter)

강압형 컨버터는 그림2.10과 같으며, 높은 입력 전압을 낮은 출력 전압으로 낮춰주는 역할을 하며, 일반적으로 배터리 충전을 목적으로 하는 소형풍력발전시스템의 경우 발전기의 출력 전압이 배터리의 충전조건이 맞도록 조절하여 충전하게 된다. 그림3.2의 충전회로도에서는 강압형 컨버터와 승압형 컨버터를 구성하였으며, MOSFET의 ON/OFF제어를 통해 필요시 강압형 컨버터 또는 승압형 컨버터를 사용하도록 설계를 하였다.

그림3.6은 강압형 컨버터의 MOSFET 스위칭조작으로 듀티비에 따른 배터리에 공급되는 전류를 나타낸 파형이다.

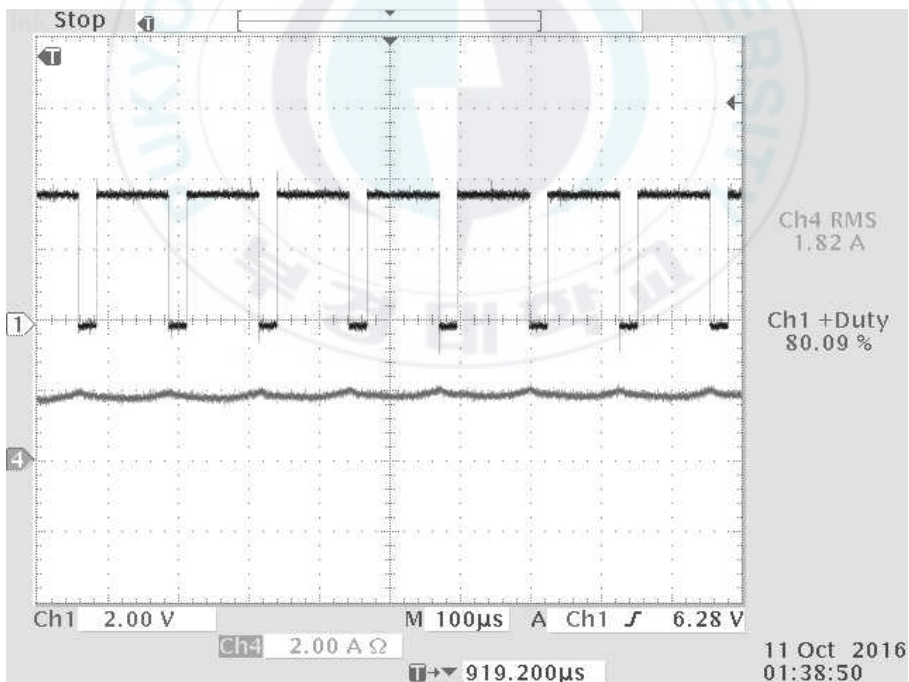


그림 3.6 강압형 컨버터 출력 전류파형

3.3.2 포토커플러를 이용한 RPM 계측

소형풍력발전기의 경우 풍속계를 따로 설치할 수 없으므로 포토커플러를 이용한 RPM추종을 한다.

포토커플러는 입력 전기 신호와 출력 전기 신호를 빛으로써 전달하는 역할을 한다. 일반적으로 발광소자와 수광소자를 하나의 패키지에 결합하여 입출력 간을 전기적으로 절연시켜 광으로 신호를 전달하는 광결합소자라고도 한다. 그림3.7이 포토커플러의 구성이다.

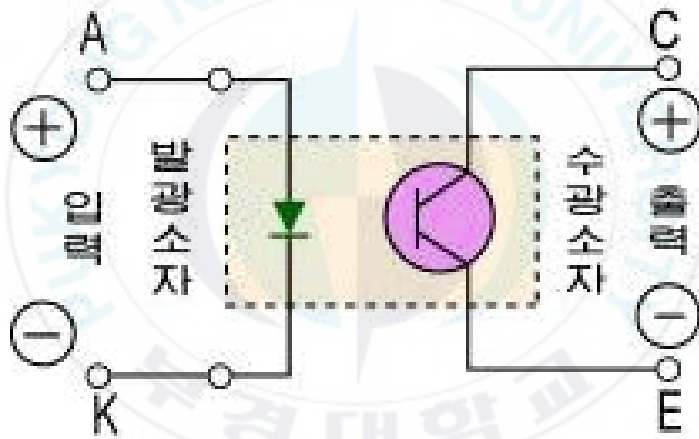


그림 3.7 포토커플러 구성

일반적으로 포토커플러의 원리를 이용하여 블레이드의 분당 회전수인 RPM을 구할 수 있다. 그림3.2에서 본 것과 같이 RPM측정회로를 구성하고, 발전기의 속도에 따라 상전압의 주파수가 달라지기 때문에 다음 식 (3.2)으로 RPM을 구할 수 있다.

$$f_e = \frac{n_m \cdot P}{120} \quad n_m = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (3.2)$$

f_e : 전기적 주파수 [Hz]

n_m : 기계적 회전속도 [rpm]

P : 극수

다른 방법으로는 포토커플러의 출력파형의 주기와 모터의 RPM을 측정하여 보간법을 이용하여 함수를 구해 포토커플러의 출력주기에 따른 RPM을 환산할 수 있다.

RPM을 구하기 위해 그림 3.8과 같이 발전기 앞에 근접센서를 이용하였다. 근접센서는 평상시 항상 High level을 유지하다가 금속물체가 일정한 거리에 들어오면 Low level을 출력한다. 따라서 발전기 회전에 따라 근접센서에서 출력되는 펄스의 Rising edge 또는 Falling edge를 분당 카운터하여 분당 회전수인 RPM을 구할 수 있다.

그림 3.9는 발전기의 상전압에 의한 포토커플러의 출력파형이며, 그림 3.10은 모터가 회전함에 따라 근접센서로부터 출력되는 파형이다. 이 두 개의 관계로부터 그림 3.11과 같이 보간법으로 3차 함수를 얻을 수 있으며, 이를 통해 모터가 회전함에 따라 포토커플러의 주기에 따른 RPM을 추종하여 구할 수 있다.

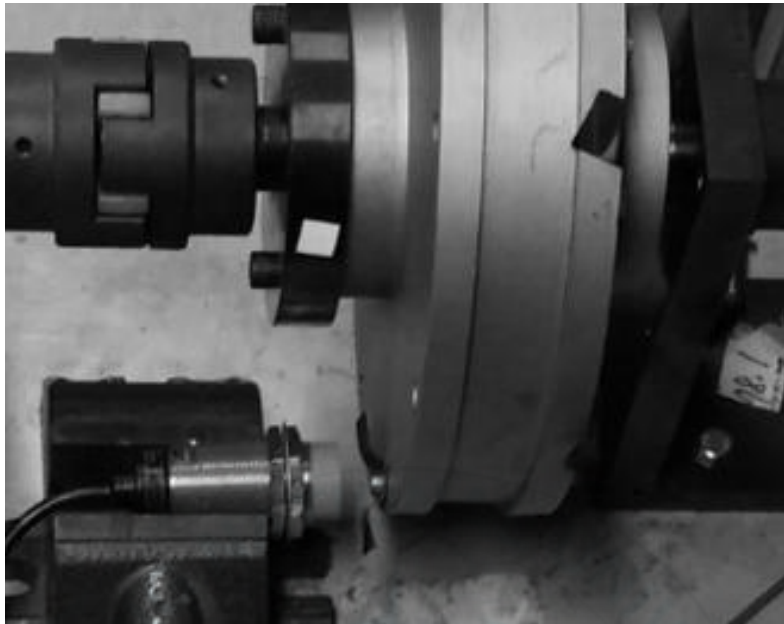


그림 3.8 근접센서를 이용한 RPM 측정

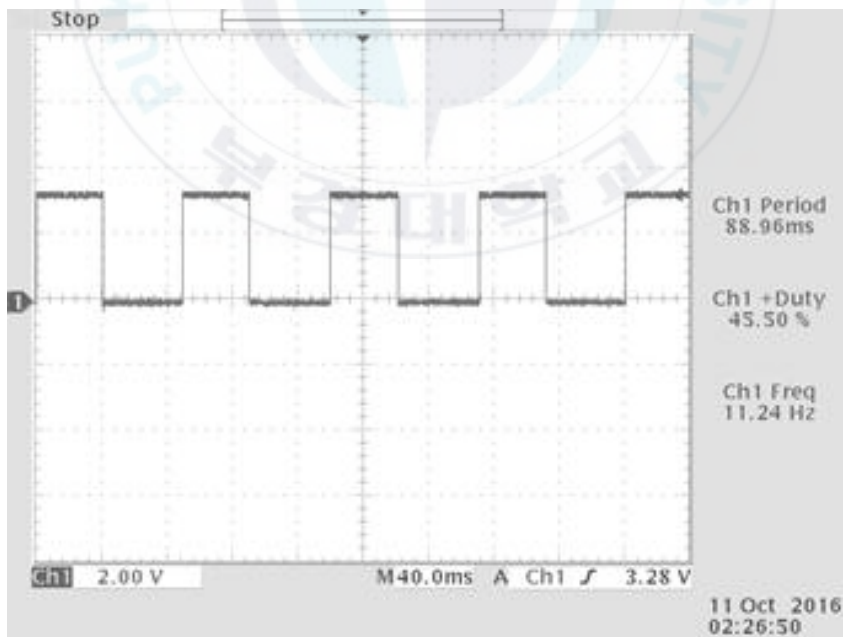


그림 3.9 포토커플러 출력파형

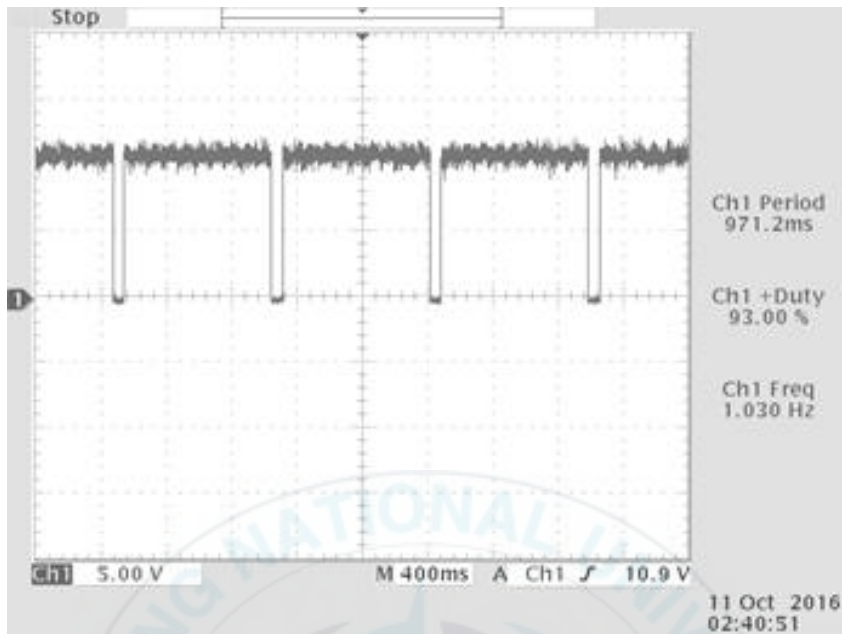


그림 3.10 근접센서 출력파형

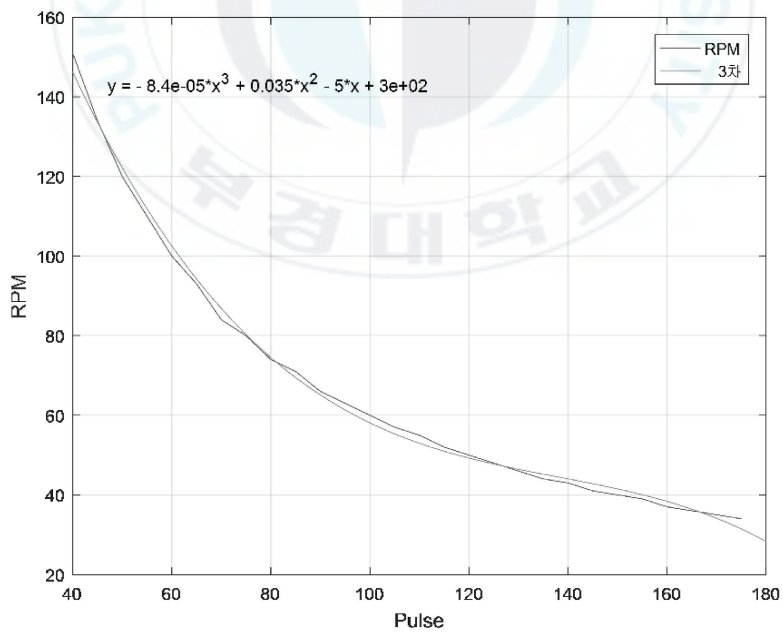


그림 3.11 보간법을 이용한 RPM 추종

3.4 풍력 시뮬레이션 알고리즘

3.4.1 풍속별 블레이드 동작특성 모델링 및 시뮬레이션

풍력발전기는 그림 3.12과 같이 블레이드는 유동적인 바람의 운동에너지를 기계적 회전에너지로 변환하는 역할을 수행하고 블레이드의 회전에 의해 발전기가 회전을 하면서 전력을 생산하게 된다. 본 연구에서 사용되는 블레이드는 그림 3.13의 헬리컬 블레이드를 사용하였고, 표 3.2이 블레이드의 스펙이다.

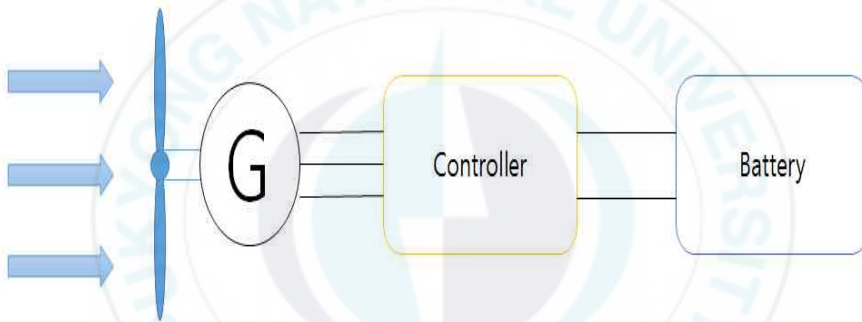


그림 3.12 풍력발전기 구성도

헬리컬 블레이드는 블레이드 개수가 4개이며, 풍속 8[m/s]에서 170[RPM]일 때 발전기에서의 최대 100[W]가 출력되도록 설계 설계하였다. 이때 시동풍속은 5[m/s]이며 정지풍속은 11[m/s]이다.



그림 3.13 헬리컬 블레이드

표 3.2 헬리컬 블레이드 디자인 스펙

블레이드 타입	헬리컬
에어포일	NACA 0018
정격 출력 전력	100 [W]
정격 풍속	8 [m/s]
블레이드 반경	0.55 [m]
블레이드 높이	1.43 [m]
시위길이	0.25 [m]
블레이드 개수	4 [EA]
블레이드 회전 속도	170 [RPM]
출력계수	0.15
주속비	1.1
솔리디티	0.3

여기서 R_t 는 로터의 반경, H_t 는 로터의 높이이다.

풍력발전기의 기계적 에너지 출력은 식(3.4)로 구할 수 있는데, 이 중에서 가장 핵심적인 출력계수와 주속비이다.

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p [W] \quad (3.4)$$

이때, ρ :공기밀도, A:수풍면적, V:풍속, C_p :출력계수이다.

표3.2에서 언급한 것과 같이 출력계수는 0.15, 주속비는 1.1이다. 이는 실제 블레이드의 풍동실험을 통해서 얻어진 값들이고, 풍동 시험은 5[m/s]에서 11[m/s]까지 풍속을 변화하며 측정하였다. 이를 이용하여 블레이드 모델링을 구현할 수 있다. 출력계수는 바람에너지로부터 블레이드가 획득하는 에너지의 비율을 의미하는데, 출력계수의 값이 클수록 바람으로부터 획득하는 에너지가 많아진다. 식(3.5)을 이용하여 블레이드의 출력계수를 구할 수 있다.

$$C_p = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \theta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3.5)$$

이때 (c_1 :1.75, c_2 :1.52, c_3 :0.4, c_4 : 0.0035, c_5 : 21, c_6 : 0.096, θ :0)를 가진다. 이런 형상계수들은 블레이드의 출력계수 값과 주속비의 값으로 유추할 수 있다. 그림 3.15는 시뮬레이션으로부터 얻은 주속비에 따른 출력계수의 파형이다.

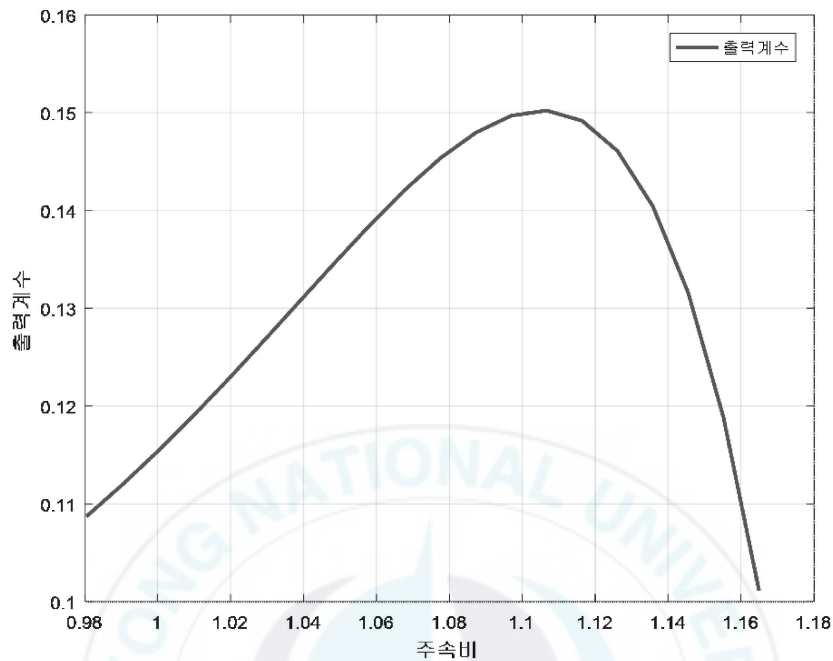


그림 3.15 주속비에 따른 출력계수

출력계수는 풍력발전기의 출력에 큰 영향 끼치며, 또한 이를 토대로 블레이드가 풍속별 회전하는 RPM에 대해서 최대 출력점을 찾을 수 있다. 그림 3.16는 시뮬레이션을 통해서 얻은 파형이며, 각 풍속별 블레이드의 동작 특성을 알 수 있다.

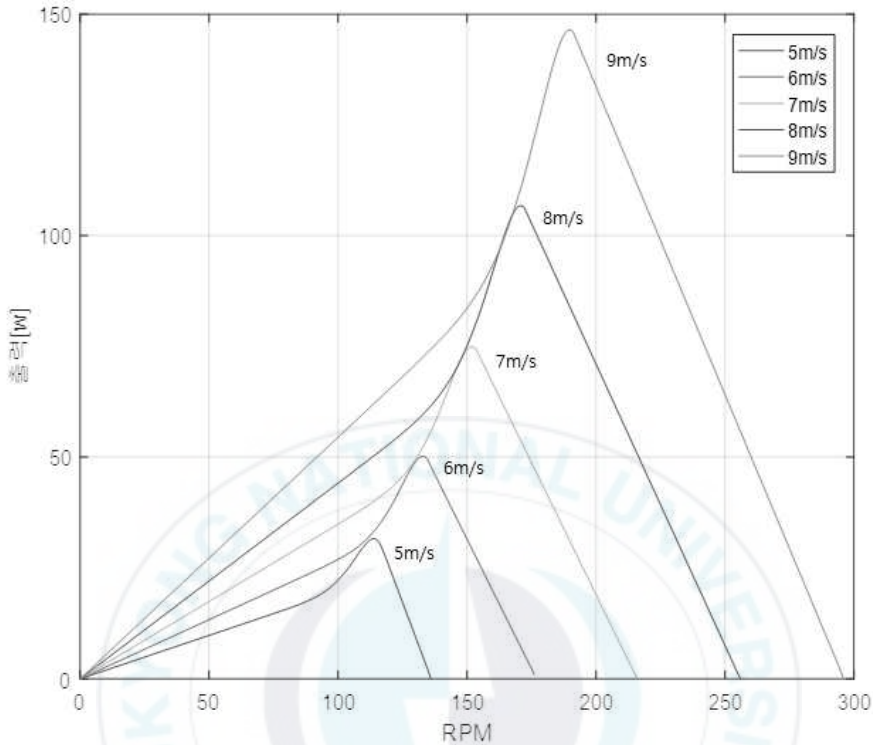


그림 3.16 각 풍속별 RPM에 따른 출력과형

3.4.2 풍속별 블레이드 회전력 모터제어 알고리즘

본 연구에서는 소형풍력발전 시뮬레이터 개발이 주 목적이며, Matlab-Simulink를 이용하여 헬리컬 블레이드에 대한 블레이드 모델링을 통해 각 풍속별 블레이드의 최대 RPM 및 출력특성을 알 수 있었다. 그림 3.14의 Matlab-Simulink의 블레이드 모델링 회로를 보면 블레이드 회전속도와 출력값을 이용하여 식(3.6)를 통해 토크를 계산할 수 있다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade}} [Nm] \quad (3.6)$$

소형풍력발전기의 경우 일반적으로 기어비는 1:1이며, 그림3.17과 같이 블레이드와 발전기의 관계를 보면 식(3.7)의 관계를 가진다[14][15].

$$T_B = (J_B + J_G) \frac{d\omega_{blade}}{dt} + T_G \quad (3.7)$$

여기서 T_B 는 블레이드의 토크, T_G 는 발전기의 토크, J_B 는 블레이드 관성, J_G 는 발전기의 관성이다.

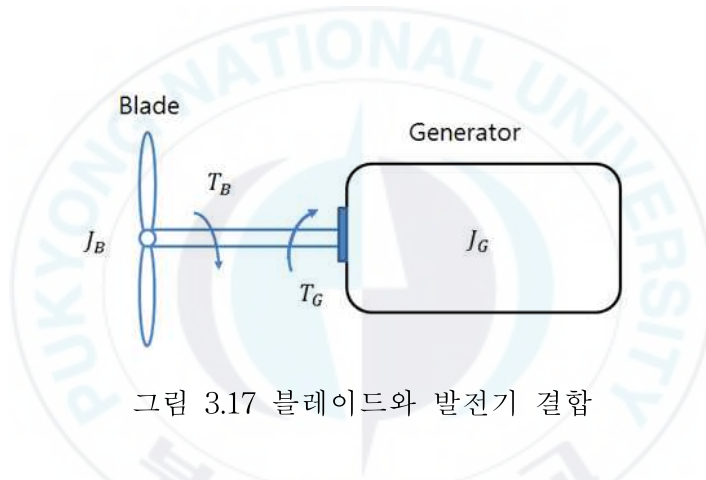


그림 3.17 블레이드와 발전기 결합

하지만, 본 연구에서 실험하고자 하는 시뮬레이터는 그림 3.18과 같이 모터와 발전기로 구성되며 식(3.8)과 같은 관계를 가진다.

$$T_M = (J_M + J_G) \frac{d\omega_{motor}}{dt} + T_G \quad (3.8)$$

여기서, T_M 은 모터의 토크, T_G 는 발전기의 토크, J_M 는 모터 관성, J_G 는 발전기의 관성이다. ω_{motor} 는 모터의 회전속도[rad/sec]이다.

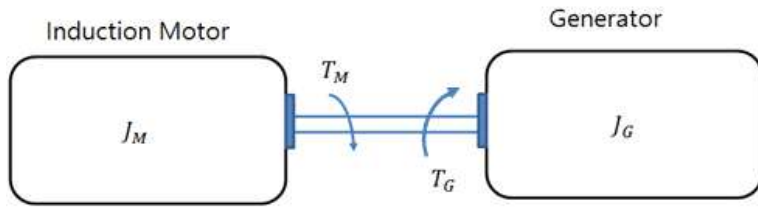


그림 3.18 모터와 발전기의 결합

본 연구에서 모터를 사용한 시뮬레이터가 블레이드를 이용한 것과 같은 속도의 특성을 보이도록 제어하여야 한다. 위식의 관계로부터 다음의 식 (3.9)으로 표현 할 수 있다.

$$T_{M_{input}} = T_M + T_G \quad (3.9)$$

여기서 관성은 무시하였으며, 모터에 공급되는 토크는 발전기의 토크를 고려하여 공급하여야 된다. 발전기 토크는 풍속에 따라 즉, 회전속도가 증가할수록 발전기에서 역기전력이 증가하여 모터의 공급토크는 작아진다. 그리고 토크는 그림3.19와 같이 전류에 비례관계를 가진다.



그림 3.19 토크와 전류의 관계

토크와 전류의 관계로부터 식(3.9)을 다음 식(3.10)의 전류 관계식으로 표현할 수 있다.

$$I_{M_{\text{input}}} = I_M + I_G \quad (3.10)$$

따라서 풍속에 따른 동작 특성과 모터와 발전기의 전류관계식으로부터 다음의 그림3.20와 같이 풍속 따라 가변적인 블레이드의 특성을 모터로 묘사할 수 있는 알고리즘을 설계 하였다.

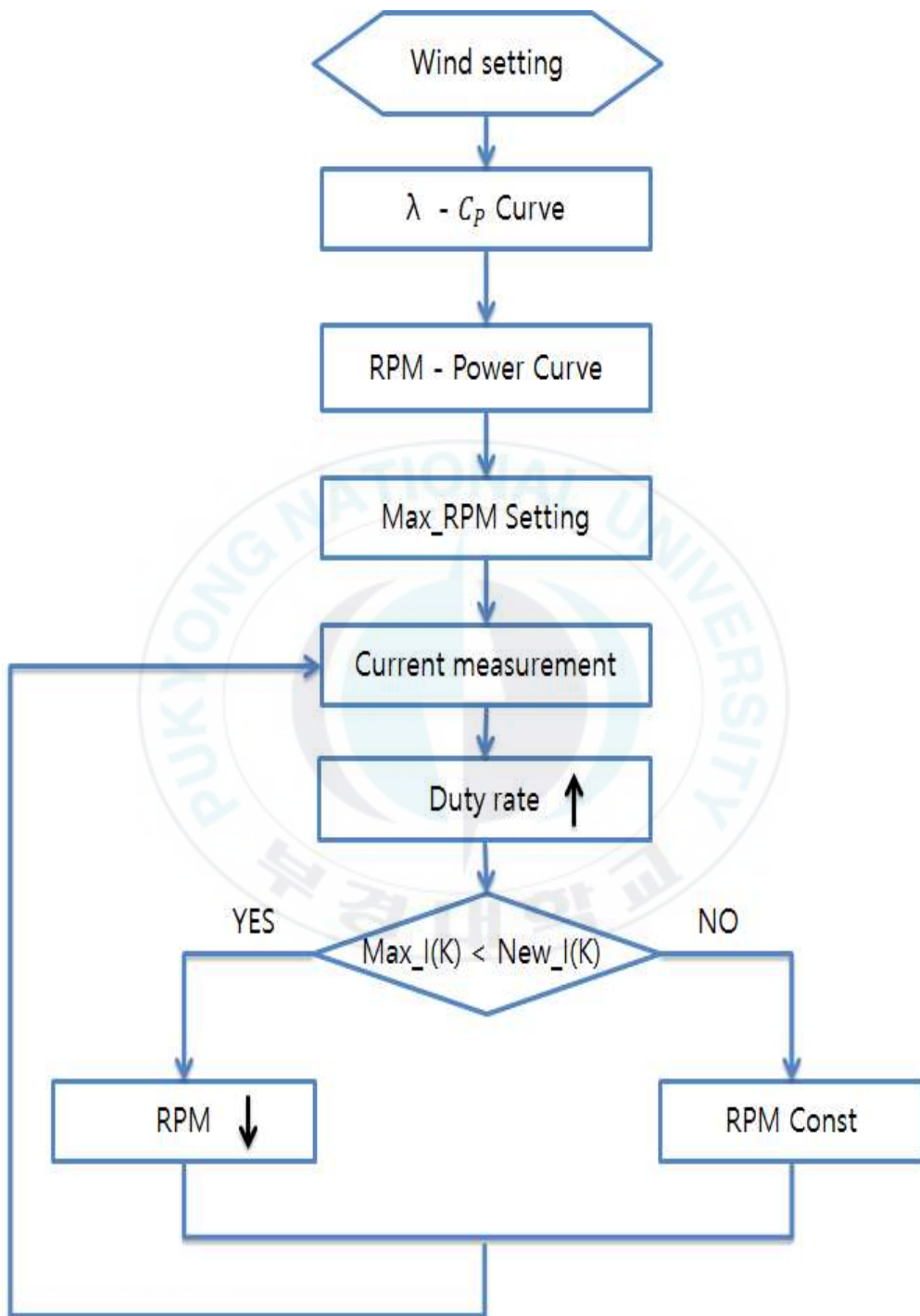


그림 3.20 풍속에 따른 모터제어 알고리즘

3.3 최대 출력점 추종(MPPT)제어 알고리즘

소형풍력발전시스템은 낮은 가격, 고신뢰도 및 고성능을 보장하는 시스템 개발이 절실히 요구된다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해서는 효율적인 최대 전력점 추종(MPPT) 알고리즘의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 현재 가장 많이 사용하고 있는 P&O방식의 제어방법을 적용하였다. 이 방식은 기본적으로 발전기의 출력전압과 전류의 곱에 의한 전력변환 계산을 기초로 두고 있으며, 현재의 출력전력과 이전 출력전력을 비교하여 최대전력점을 찾는 방식이다. 그림3.21는 최대 전력점 추종 곡선으로 각 풍속에 따라 항상 최대 전력점을 찾아가는 곡선을 나타내었다 [16][17][18].

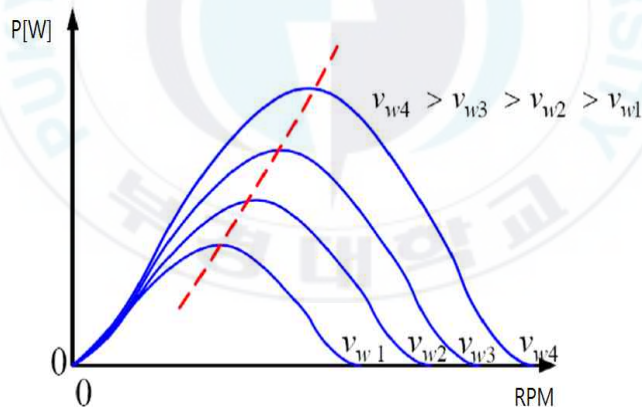


그림 3.21 최대 전력점 추종곡선

소형풍력발전기는 배터리에 충전을 하기위해 기본적으로 DC전압을 생성하기 위한 정류기와 배터리에 전력을 공급하기 위한 컨버터로 구성되어 있으며, 컨버터의 듀티비를 제어함으로써 풍력발전기의 최대전력점을 제

어 하게 된다.

그림 3.22은 P&O방식의 최대전력점 추종(MPPT)제어 알고리즘이며, 발전기로부터 출력되는 전압과 전류를 센싱 받고, 배터리의 충전조건이 맞으면 전압과 전류를 전력으로 환산하여 이전 전력과 현재 전력을 실시간으로 비교하여 현재 전력이 높으면 듀티비를 증가시키고, 낮으면 감소시킴으로써 항상 최대 전력점을 유지하도록 한다.

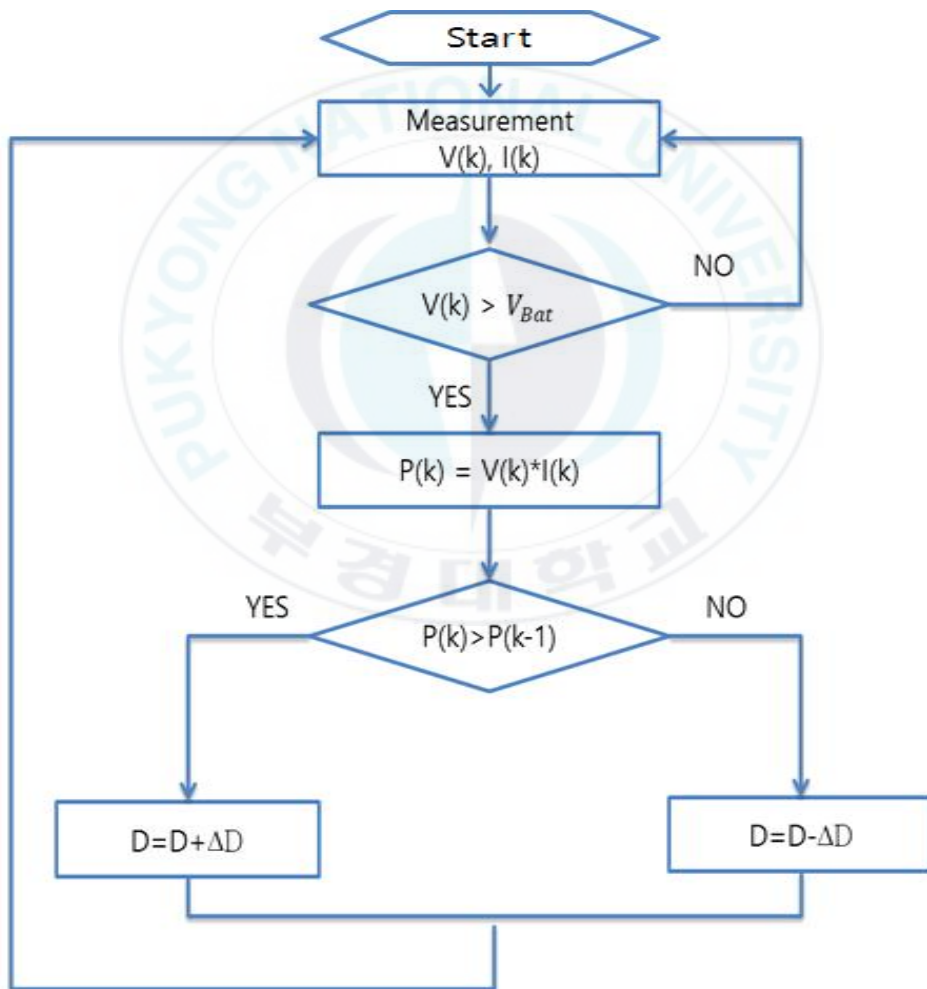


그림 3.22 최대 전력점 추종(MPPT)제어 알고리즘

제 4 장 풍력발전 시뮬레이터 실험 및 결과

4.1 실험구성

3장에서 마이크로컨트롤러와 각 회로에 대한 설명을 하였으며, 본 연구 실험에서는 실제로 부하에 따라 가변적인 풍력발전기의 블레이드 특성을 구현하기 위해 그림 4.1과 같이 시뮬레이터를 구성하였고, 발전기와 배터리의 역기전력으로 인해 가변적인 블레이드 동작특성을 모터를 이용하여 묘사하기 위해 인버터에 공급되는 전류를 실시간으로 측정하였다.

그림 3.2는 각 요소들을 실제로 연결하여 제작한 시뮬레이터 테스트베드의 사진이다. 인덕션 모터와 동기발전기를 사용하였으며, 인버터를 이용하여 모터를 제어하였다. 그리고 발전기에서 출력되는 전력은 충전제어기를 이용하여 12V 배터리에 충전 제어를 하도록 설계하였다.

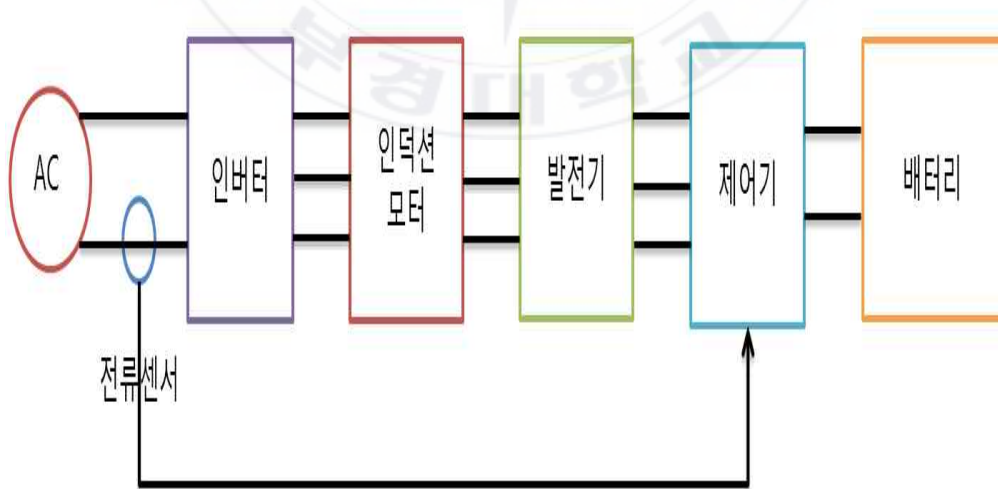


그림4.1 시뮬레이터 구성도

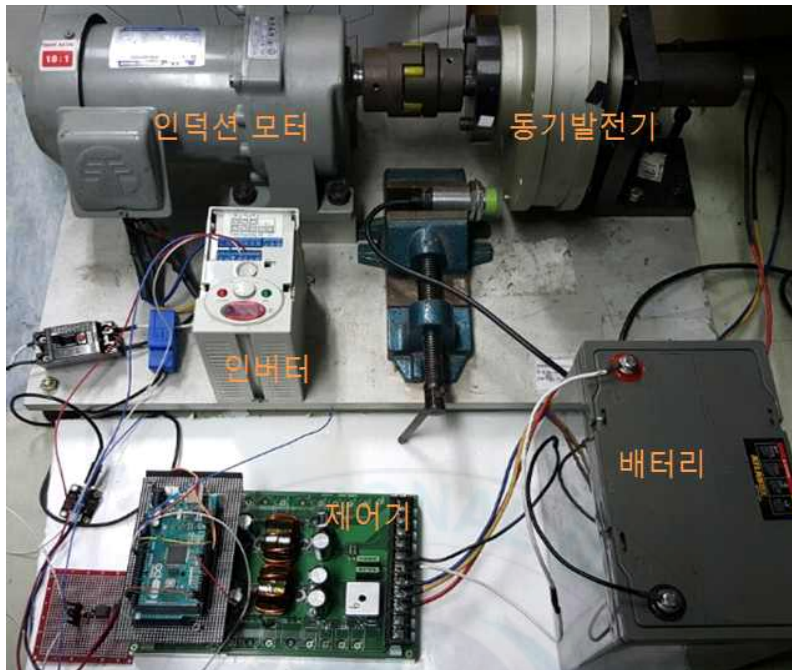


그림 3.2 시뮬레이터 테스트베드 구성 사진

4.2 풍력발전 시뮬레이터 실험

3장에서 설명한 헬리컬 블레이드에 관한 모델링 설계를 통해 얻어진 시뮬레이션 결과와 모터제어 알고리즘을 이용하여 모터를 제어 하게 된다. 헬리컬 블레이드 시뮬레이션으로부터 얻어진 각 풍속별 최대 RPM이 입력이 되며, 전류센서를 실시간으로 피드백 받아 모터제어알고리즘에 의해 모터가 제어가 된다. 따라서 모터 제어를 통해 부하 변동 즉, 발전기 회전으로 인해 발생하는 역기전력과 배터리가 충전되면서 발생하는 역기전력에 따라 모터의 RPM을 가변적으로 제어한다.

이러한 모든 제어기들은 Microcontroller로 Arduino를 사용하였고, Matlab-Simulink와 연동하여 그림3.3와 같이 구성하여 설계 하였다.

Arduino와 Matlab-Simulink를 연동하게 되면 장점으로는 프로그램 구동 시 실시간으로 Display와 Scope를 이용하여 파형을 볼 수 있을 뿐만 아니라, Workspace를 이용해 정보 수집이 가능하다.

구성은 Sensor측정(전압, 전류, RPM), 인버터제어, MOSFET GATE제어, MPPT 제어, LOAD 제어, BRAKE 제어로 구성되어 있다.



WIND_POWER_CHARGE_CONTROL

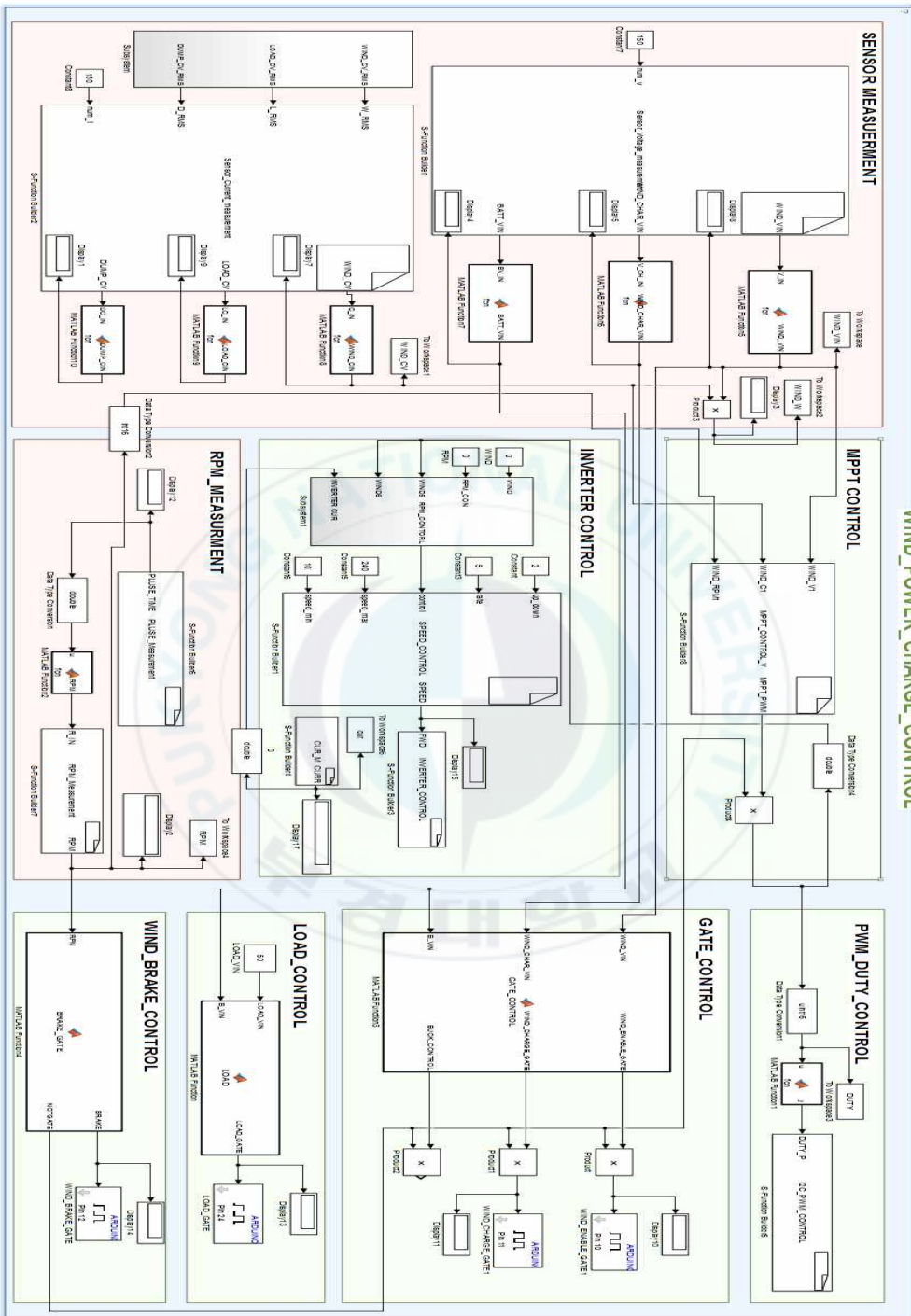


그림 3.3 Matlab-Simulink와 Arduino연동을 이용한 제어기

4.2.1 시뮬레이터 제어에 의한 발전량측정

풍속에 따라 가변적인 블레이드의 동작특성을 모터로 묘사하기 위해 모터제어 알고리즘을 설계하였고, Matlab-Simulink와 Arduino를 연동하여 구현하였다. 그림 4.5는 풍속 5[m/s]에서 모터제어 알고리즘을 통해 인버터에 공급되는 전류의 량이다. 그림 4.6 은 충전전력에 따른 MOSFET의 듀티비 증가에 따라 최대136[RPM]에서 90[RPM]까지 감소하는 그래프이며, 그림 4.7은 듀티비 증가에 따라 배터리에 공급되는 전력량의 변화곡선 그래프이다. 그림4.8은 RPM에 따른 배터리에 공급되는 전력량 곡선이다. 이는 발전기와 배터리의 역기전력이 증가함에 따라 RPM이 감소되고 이로 인해 배터리에 공급되는 발전량 또한 감소된다는 것을 알 수 있다. 그림4.9는 풍속5[m/s]와 6[m/s]에서의 RPM에 따른 배터리에 공급되는 전력량 곡선으로 풍속이 증가함에 따라 최대 RPM, 배터리에 공급되는 전력이 증가한다.

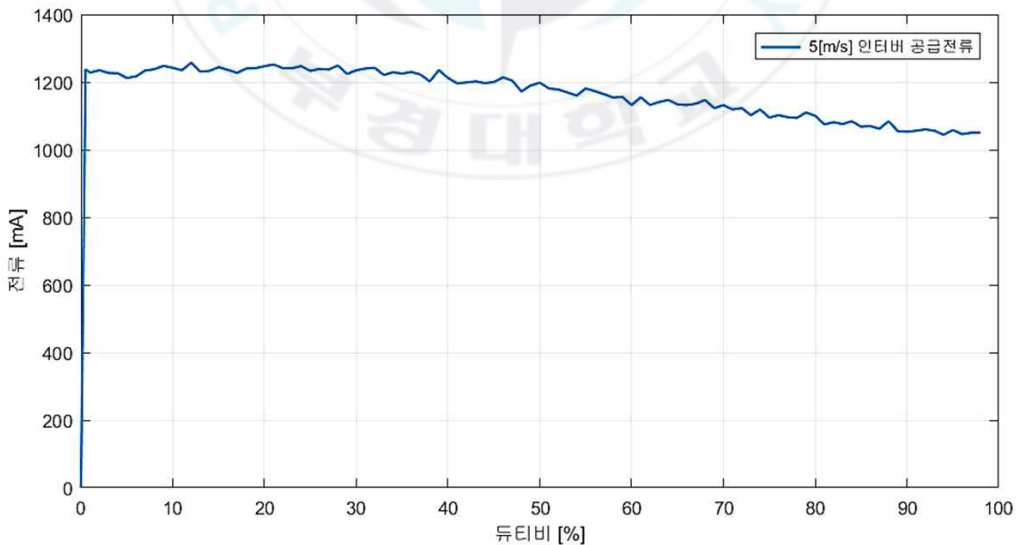


그림4.5 풍속 5[m/s]에서의 듀티비에 따른 인버터공급전류

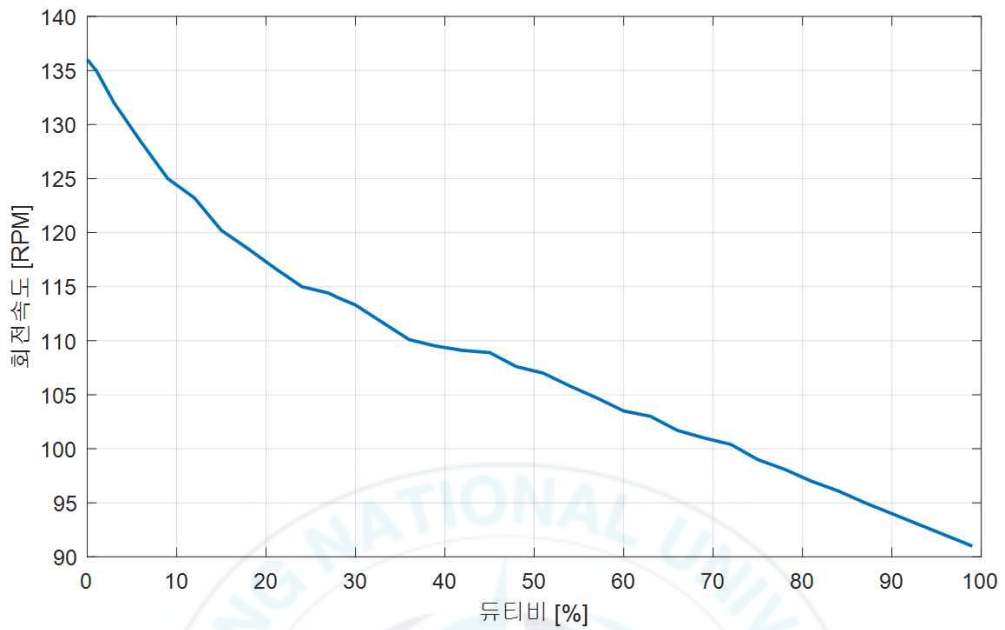


그림4.6 풍속 5[m/s]에서의 듀티비에 따른 RPM

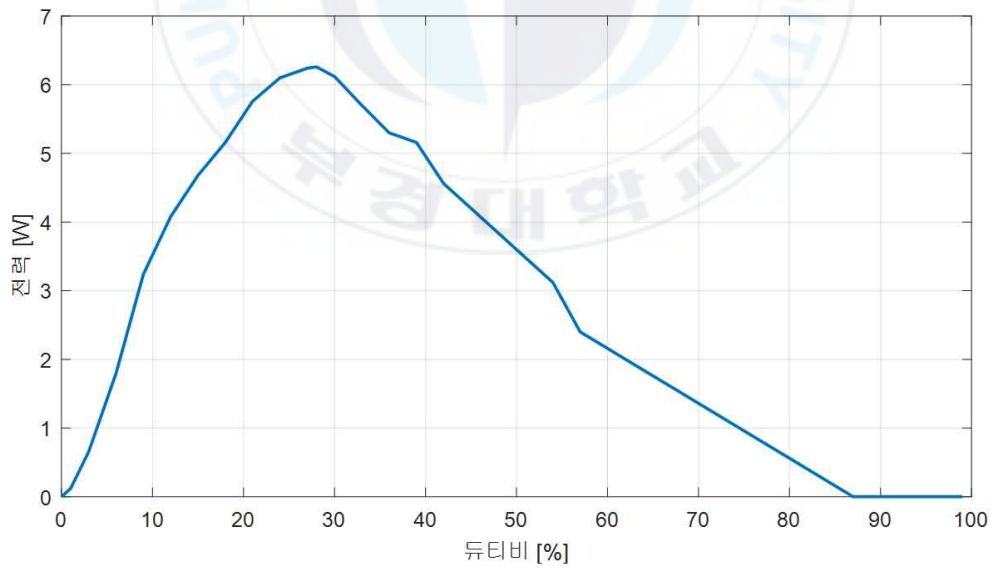


그림4.7 풍속 5[m/s]에서의 듀티비에 따른 전력량

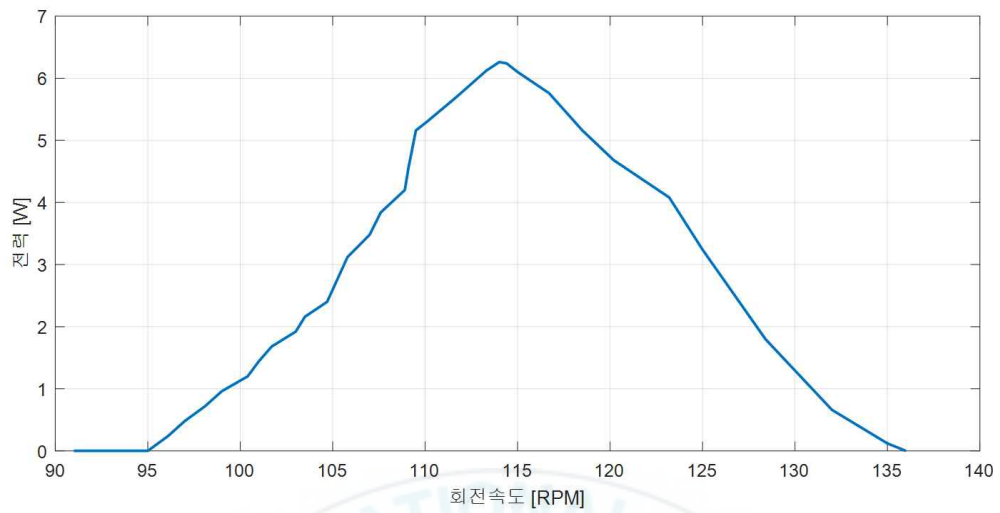


그림4.8 풍속 5[m/s]에서의 RPM에 따른 전력량

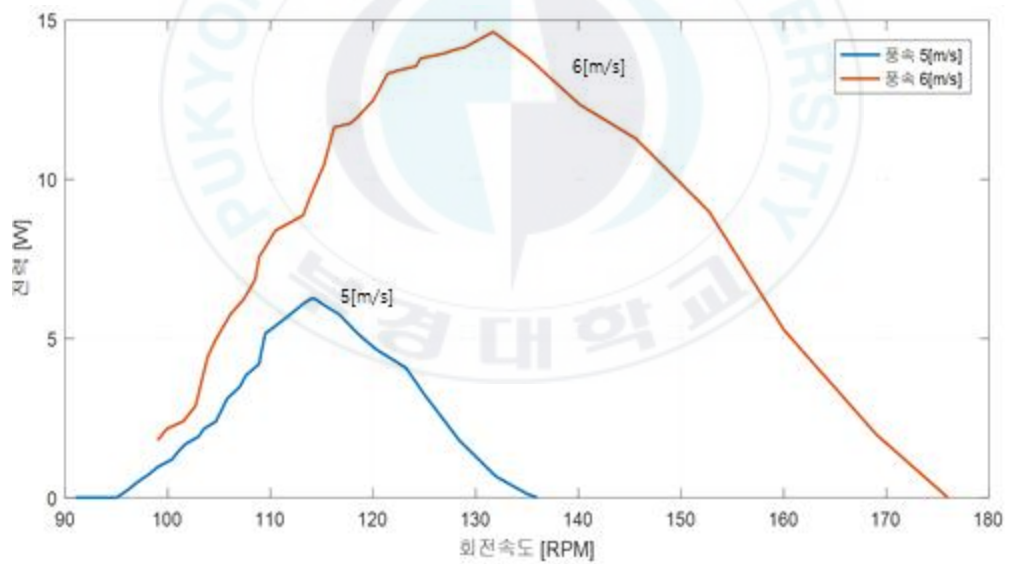


그림4.9 풍속 5~6[m/s]에서의 RPM에 따른 전력량

4.2.2 풍동실험에 의한 발전량측정

풍동 실험은 전북대학교 대형풍동실험센터에서 진행하였으며, 풍동 실험장의 내부 구조는 그림 4.10과 같다. 너비 5m, 높이 2.5m, 길이20m의 대형 풍동 실험기이다. 풍동 실험기의 사양은 표4.1와 같다. 그림 4.11는 실험하기위해 구성한 사진이다. 실제 풍동실험장에서 모터로 제어하는 시뮬레이터처럼 무부하 상태에서 최대 RPM까지 블레이드를 회전 시키면 블레이드에 무리가 생기기 때문에 일정한 부하를 걸어놓은 상태에서 회전을 시킨다. 그림 4.12은 각 풍속별 RPM에 따른 전력량 그래프이며, 최대 전력점추종(MPPT) 알고리즘을 구현할 때의 추종곡선을 나타내었다.

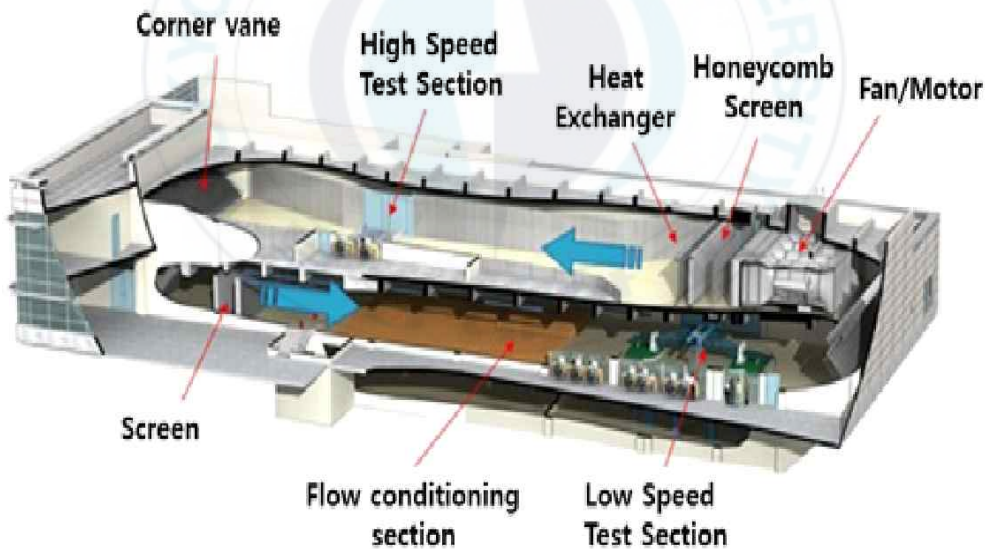


그림4.10 풍동실험장 내부구조

표 4.1 풍동실험기 사양

Wind tunnel type	Closed circuit type boundary layer wind tunnel
Test section	2m(W) × 5m(H) × 20m(L)
Wind velocity range	0.5 m/s ~ 30 m/s
Turbulence intensity	1.5% or less



그림 4.11 풍동실험장 사진

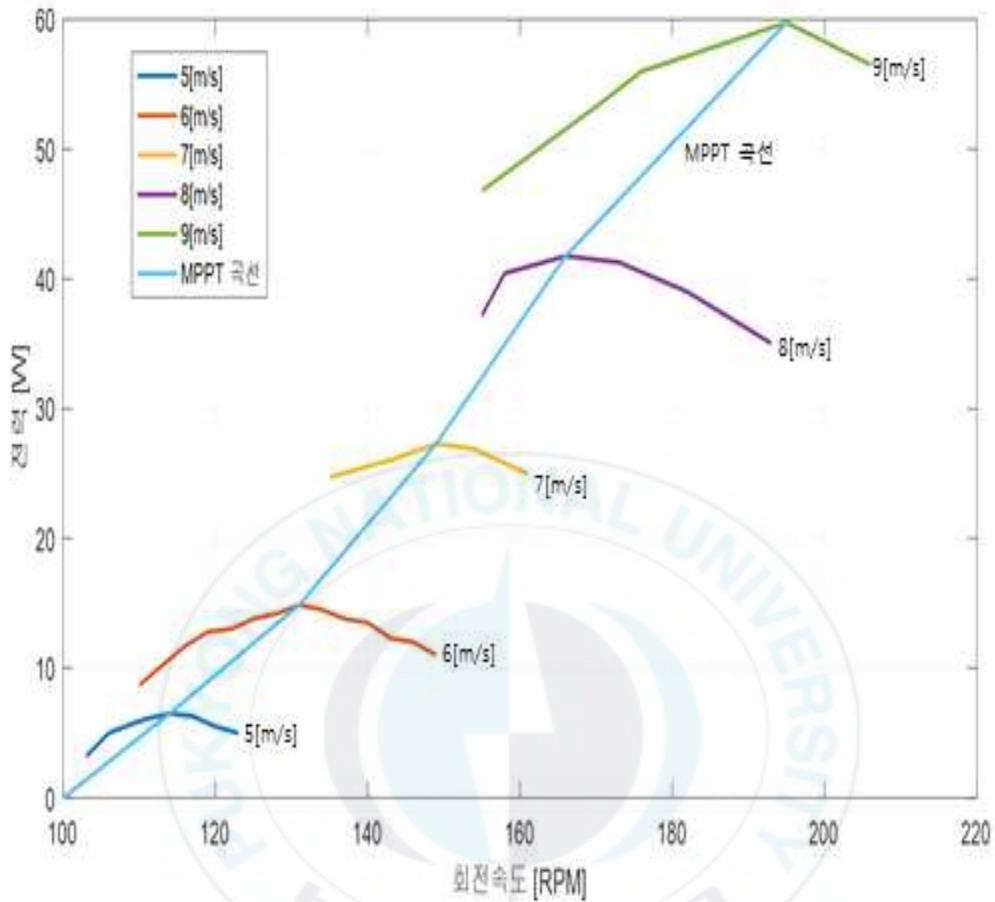


그림4.12 각 풍속별 전력량 및 최대전력점추종 곡선

그림4.13와 4.14는 모터제어 알고리즘을 통해 구현한 시뮬레이터의 RPM에 따른 전력량과 실제 풍동실험을 통해 얻은 전력량을 비교한 것으로 약 5%이내의 오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

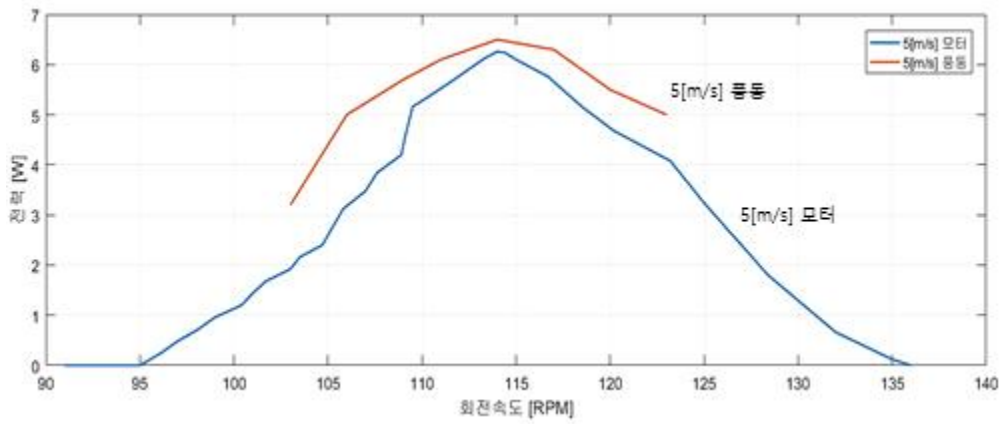


그림4.13 5[m/s]에서 시뮬레이터와 풍동실험의 전력량비교

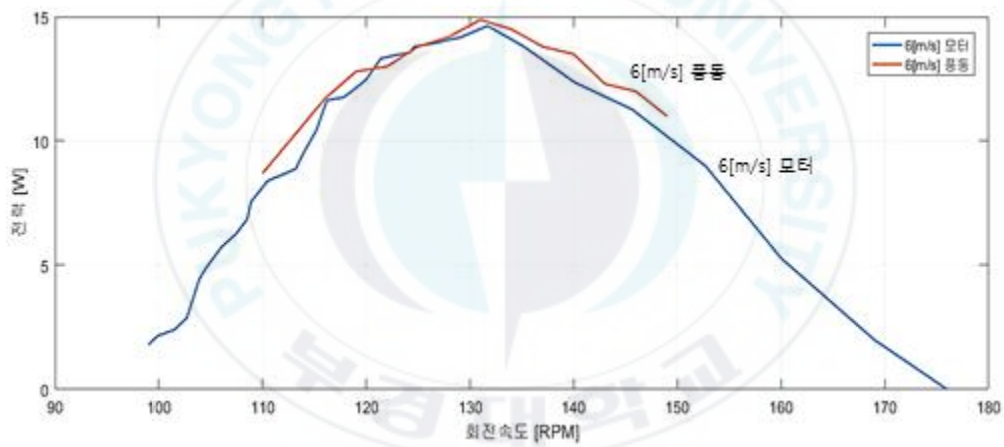


그림4.14 6[m/s]에서 시뮬레이터와 풍동실험의 전력량비교

제 5 장 결 론

풍력발전시스템을 실험하기 위해 시뮬레이터 테스트베드를 구축하였고, 기존에는 토크센서를 이용하여 많은 연구가 진행되고 있었으나, 토크센서의 비용이 비싸다는 단점이 있어서 본 연구에서는 토크와 비례관계를 가지는 전류센서를 이용하였다. 헬리컬 블레이드의 파라미터를 이용하여 각 풍속별 시뮬레이션을 하고, 시뮬레이션 결과 값을 이용하여 풍속에 따라 가변적인 블레이드의 동작특성을 모터로 구현하였다. 여기서 전류센서 데이터를 실시간으로 피드백 받아 모터제어 알고리즘을 구성하였고, 풍속에 따라 가변적인 블레이드에 따라 항상 최대 전력을 배터리로 충전하기 위해 최대 전력점추종(MPPT)제어 알고리즘을 구성하였다. 이러한 제어알고리즘을 통해 시뮬레이터로 구현할 때의 속도에 따른 전력과 실제 풍동실험을 통해 얻은 데이터를 비교 하였을 때 약 5%정도의 오차로 유사한 결과를 도출할 수 있었다.

기존에는 풍력발전시스템을 설계한 후 실제 풍력과 유사한 환경을 조성하여 풍동실험을 하였으나, 시뮬레이터 제어를 통해 풍동실험과 유사한 결과 값을 도출해냄으로써 풍동실험에 의한 비용·공간적 문제를 개선할 수 있고, 풍동실험을 한다 하더라도 그전에 발전기의 효율을 테스트함으로써 풍동실험 전 재정비가 가능하고, 미리 알고리즘을 설계함으로써 시간 절약을 할 수 있는 장점이 있다.

참고 문헌

- [1] 김필호 “풍력에너지 기초”,성안당 , 2013.
- [2] Cho K. H, “The Prediction of the location and electric Power for Small Wind Powers in the H University Campus“, 한국생태환경건축학회지 vol. 12, no. 1, 2012.02, pp127-132.
- [3] New Energy Finanace, “태양광과 풍력시장의 전망”
- [4] Pike Reserach WWEA 2012, “소형풍력발전기 전 세계연간 설치 용량 전망”
- [5] Pke Reserach WWEA 2012, “소형풍력발전기 시장 규모 전망”
- [6] 황병선 “(최신)풍력터빈의 이해” ,아진 ,2009
- [7] 황병선 “풍력공학일반” ,아진 ,2010
- [8] 남윤수 “풍력터빈의 제어” ,GS 인터뷰전 ,2009
- [9] Oh S. J, “Development of Hardware Simulator for DFIG Wind Power System Composed of Anemometer and Motor-Generator Set”, 전력전자학회논문지 Vol. 16, No. 1, 2011.02, pp11-19.
- [10] 백수현 “전력전자공학” ,교보문고 ,2011
- [11] 정해광 “(풍력발전 시스템의)전력전자기술 : 설계 및 제어” ,한티미디어, 2014
- [12] Kostas K, “Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications”, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, no.2, April 2006
- [13] Youk Y. S, "Design of Fuzzy Logic based MPPT Alogrithm for Urban Wind Turbine System", Korean Institute of Intelligent Systems., vol. 20, no. 1, 2010.02, pp.21-29

- [14] Hyun J. H, "The Adaptive Maximum Power Point Tracking Control in Wind Turbine System Using Torque Control", Institute of Korean Electrical and Electronics, Vol. 19, No. 2, 2015.06, pp. 225-231
- [15] Jeong B. C, "Control Algorithm for Wind Turbines Simulator with Variable Inertia Emulation", The Korean Institute of Electrical Engineers, 2015. 06, pp. 170-173
- [16] Lee Y. S, " Comparison of MPPT Control Method Characteristic for stand-alone PV system", The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 61, no. 1, 2012.01, pp75-79
- [17] Lee J. M, "The MPPT Control Method of the PMSG Wind Generation System using the Turbine Model with a Squirrel Cage Induction Motor", The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 61, no. 2, 2012.02, pp231-236.
- [18] Dhananjay C, "DC-DC Buck-Converter for MPPT of PV system", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 4, no. 7, July 2014, pp. 2250-2459

감사의 글

학부 3학년부터 융합시스템연구실에 들어와 생활을 하다가 학·석사 연계과정을 통해 학부와 대학원 수업을 동시에 들으면서 많이 힘들었지만, 연구실에서 부족한 저를 항상 이끌어 주시고 충고와 격려를 아끼지 않으신 변기식 교수님께 감사드립니다. 그리고 논문 작성 중에 취업이 되어, 회사 연수생활 중에 논문을 작성을 하면서 많은 걱정을 끼쳐드려 죄송하고, 이 논문이 완성되기 까지 언제나 아낌없는 조언과 지도를 해주셔서 진심으로 감사드립니다. 논문을 작성하면서 많이 부족한 저를 지적 해주시고, 바쁘신 와중에서 시간을 내어 지도해주신 안영주 교수님, 김만고 교수님께 감사드리며, 밤늦도록 열과 성을 다해 학문의 길로 이끌어주신 이형기 교수님, 최연욱 교수님, 김남호 교수님, 황용연 교수님, 이경창 교수님께 깊은 감사드립니다.

융합시스템 연구실에서 밤, 낮으로 지내면서 많은 조언과 어려움이 있을 때 마다 힘이 되어 주신 김민 박사님, 친형 같이 편안하고 항상 저를 친동생으로 챙겨주신 재훈이형, 동현이형 그리고 연구실의 웃음꽃을 펼쳐주신 명훈이형, 재준이형, 우리 연구실의 홍일점인 막내 지현이, 타지에 와서 열심히 하는 미흐렛, 우리 융합시스템 연구실 식구들 모두 사랑하고 감사드립니다. 그리고 졸업 후에도 항상 후배들을 챙기시는 병삼이형, 경민이형, 현조형, 과제를 수행할 때 마다 도와주신 원영수 박사님, 우와테크 사장님 정말 감사드립니다. 대학생활하면서 힘들거나 지칠 때 같이 술을 마시며 즐겁게 보냈던 친구들 민혁이, 진욱이 그리고 동현이, 황범이 등 친구들 이름을 다 나열하지 못하지만 항상 힘이 되어준 친구들에게 고맙고, 꼭 성공하길 바랍니다.

마지막으로 대학원 졸업까지 저를 믿고 항상 응원 해주신 아버지와 어머니 그리고 모든 가족들에게 감사드립니다. 앞으로도 항상 초심을 잃지 않고 최선을 다하는 사람이 되겠습니다. 감사합니다.

2017년 2월
박원현 올림