풍력발전기 진단 및 청소를 위한 로봇의 모델링 및 자세제어

A Modeling and Attitude Control of an Inspection and Cleaning Robot for Wind Turbines

공진영, 이재순, 강연식, 조백규*
 (Jin-Young Kong¹, Jae-Soon Lee², Yeon-Sik Kang³, and Baek-Kyu Cho^{1,*})

¹School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin University

²Department of Mechanics and Design, Kookmin University

³School of Automotive Engineering, Kookmin University

Abstract: Wind turbines are in the limelight in the alternative energy industry. However, they face frequent and various problems during operation. We focused on the supervising of the blades of a wind turbine. In this paper, we present the design of a maintenance robot that takes the size of wind turbine blades into consideration, so the general form of the robot is a square with four wires fixed to its vertices and to the nacelle. After the robot is placed near the nacelle, it moves along the blades. We also designed an attitude control algorithm for the robot to maintain its balance. Our control algorithm for the robot consists of roll and pitch attitude controllers and a height controller. Each controller was designed independently and then superposed together. We used simulations to verify our control algorithm.

Keywords: alternative energy, damage, ocean wind power generator, detect, robot system, attitude control, repair, blade, model

1. INTRODUCTION

산업혁명과 고도 사회 발전을 일으키는데 기반이 되었던 지하자원의 고갈로 현대사회는 대체에너지로 눈을 돌리고 있다. 대체에너지란 석유에 대체되는 에너지원으로써, 원자력, 태양열, 수력, 지열, 풍력, 해양에너지, 바이오매스 에너지 등 환경에 적은 영향을 미치는 에너지를 가리킨다. 대체에너지 사업은 나날이 발전 하고 있다. 그 중에 풍력을 이용한 풍력발전기의 시장은 해를 거듭할수록 지속적인 성장을 하고 있는 추세이다. World Wind Energy Association에서 발표한 자료 (그림 1)에서도 확인할 수 있듯이 세계적으로 풍력발전기의 신규 설치 수는 꾸준히 증가 하고 있다[1]. 우리나라도 세계 시장의 추세에 맞게 풍력 발전기의 설치 수의 누적량이 꾸준히 증가 하고 있다(그림 2). 2012년 12월말 기준으로 풍력발전 누적 설치량은 471.7MW 규모로 총 293기 (소형풍력 (750kW 미만) 25기(9,443kW) 포함)가 설치된 것으로 파악 되었다[2]. 게다가 정부는 2010년 신재생 에너지 발전 전략 (2010.10. 제9차 녹색 성장 위원회 보고)을 수립 · 시행하였으며, 이에 따라 풍력 산업을 제2의 조선 사업으로 육성하여 2020년 세계 3대 해상풍력 강국 실현을 비전으로 선정하고

이를 위해 2011년 11월 “서남해안 2.5GW 해상 풍력개발 종합추진계획”을 발표하였다(그림 3).

우리나라의 풍력발전기 설치량의 증가뿐만 아니라 정부에서 해상풍력개발 종합추진 계획을 할 만큼 풍력발전기가 중요한 사업임을 보여준다. 이처럼 풍력발전기사업이 지속적인 성장을 하는 것에 반해 현재 풍력발전기는 잔 고장 등의 이유로 수시로 멈추게 되는 문제에 직면해 있다. 이런 문제로 인해 풍력발전기의 효율을 제대로 살리고 있지 못하다. 따라서 해상풍력발전기에 대해 유지, 보수 그리고 청결하게 관리 할 수 있는 기술들이 필요해지고 있는 상황이다.

이미 선진국에서는 이러한 기술의 필요성을 느끼고 기술 개발을 하고 있으며 현재 신 재생에너지 사업의 선진국인 독일에서는 대표적으로 ‘Fraunhofer’ (그림 4) 회사에서 풍력발전기의 블레이드를 청소하고 유지 및 보수하는 로봇을 개발하고 있다[5].

풍력발전 연도별 신규설치 (MW)

그림 1. 세계 풍력발전 연도별 신규설치.

Fig. 1. World wind turbine new installation by year.

* Corresponding Author

Manuscript received February 13, 2014 / revised March 20, 2014 / accepted May 22, 2014

공진영, 조백규: 국민대학교 기계시스템공학부

(kgy401@gmail.com/swan0421@gmail.com)

이재순: 국민대학원 기계설계학과(flswhkd1@gmail.com)

강연식: 국민대학교 자동차IT융합학과(ykang@kookmin.ac.kr)

※ 본 연구는 2013년도 산업통신자원부의 재원으로 ‘5MW급 해상풍력발전기용 블레이드 손상감지 및 공력성능 운영관리를 위한 로봇 기술개발 연구’의 연구내용임.

※ 본 연구는 2013년도 산업통신자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No.20134040200580)을 받아 수행한 연구임.

그림 2. 국내 연간 설치 량 및 누적 설치량.

Fig. 2. The yearly domestic wind turbine installation and accumulated installation.

그림 3. 서남해 2.5GW 해상풍력개발사업 Road Map.

Fig. 3. 2.5GW offshore wind turbine development Road map of Southwest sea in Korea.

그림 4. Fraunhofer사의 로봇.

Fig. 4. Cleaning Robot of Wind Turbine in Fraunhofer inc.

해상풍력발전기를 유지 및 보수 로봇의 핵심 기술은 로봇이 풍력발전기에 부착되어 있는 상태에서도 돌풍과 같은 외란에 흔들리지 않고 작업을 하는데 있다. 본 논문에서는 풍력발전기의 블레이드를 청소하고 진단하는 로봇의 개념 설계안을 제시하고 로봇의 안정된 균형을 위해 필요한 자세제어 알고리즘을 제안한다.

II 장에서는 로봇의 개념설계, III 장은 제어 알고리즘, IV 장은 실험값을 다루어 제어 알고리즘에 대한 타당성을 입증한다. 마지막으로 결론을 통해 본 논문을 마무리한다.

II. MODELLING

1. 해상풍력발전기

그림 5. 5MW급 해상풍력발전기.

Fig. 5. 5MW-Class offshore wind turbine.

표 1. 5MW급 해상풍력발전기의 재원.

Table 1. The specification of 5MW-Class offshore wind turbine.

Contents		Data
The Number of Blades		3
Height(until rotor)		87.6m
Maximum height		150m
Rotor angle		5°
Hub	Radius	5.5m
	The Number of Blades	3
	Thick	0.4m
Nacelle	Radius of Center	5m
	Length	15m
	Angle with Tower	95°
	Height	6m
	Radius of Tower contact	1.935m
Support	Height	26.9m
	Width	16.5m
	Height length	16.5m
Blade	Length	61.5m
	Angle of Bending	2°
Tower	Height	87.6m
	Top diameter	3.87m
	Bottom diameter	6m

본 논문에서 로봇의 작업공간이 될 해상풍력발전기는 5MW급이다. 따라서 이것에 맞는 모델이 있어야 한다. 조건에 맞는 모델을 만들기 위해 참고문헌[3,4]을 참조하여 해상풍력발전기의 모델을 그림 5처럼 같이 생성하였다. 해상풍력발전기는 타워, 나셀, 로터, 블레이드, 허브로 구성되어 있다. 표 1에 나타난 바와 같이 해상풍력발전기의 전체 높이는 150m이고 타워의 높이는 87.6m이다. 그리고 61.5m의 길이를 갖는 블레이드 3개로 구성 되어있다.

2. 로봇의 개념설계

로봇을 설계하기 위해선 로봇의 주 작업공간인 블레이드를 알 필요가 있다. 블레이드가 실린더 형태의 원통이 아니기 때문에 항상 일정한 단면을 갖고 있지 않다. 로봇이 블레이드 전구간을 이동 할 수 있어야 하기 때문에 블레이드 단면의 크기를 고려해야 한다.

블레이드의 단면은 나셀을 기준으로 거리가 0m일 때는 직경이 3.6m 이고 15m 떨어진 지점에서 최대직경 4.4m를 갖는다. 그림 6는 블레이드의 높이 별 단면도를 나타낸 것이고 표 2는 나셀을 기준으로 떨어진 거리에 따른 단면의 지름이다.

그림 6. 블레이드의 높이별 단면도.

Fig. 6. Cross-section of blade with respect to the height.

표 2. 블레이드의 높이별 단면 직경.

Table 2. Cross-section diameter of blade with respect to the height.

Length (m)	Maximum Diameter (m)
0	3.6
5	3.6
15	4.4
25	4
35	3.4
45	2.6
55	1.6

그림 7. 로봇의 시뮬레이션 모델.

Fig. 7. Simulation model of the proposed robot.

표 3. 로봇 모델의 정보.

Table 3. The specification of the proposed robot.

Type	Size and Purpose	Name	Remarks
Size	5.4m×6.5m		
Weight	500kg		
Thick	500mm		
Joint	Spherical joint	Implement the motion of the wire	B1~B8 4×3DOF
	Wire	Elastic linear Actuator	L5~L8 4×1DOF
	Blade fixed assets	Spring-Damper	L13~L16 4×1DOF
Sensor	F/T	Measurement of the force for supporting the robot	
	IMU	Measure the posture of the robot	
	Encoder	Measure the length of the wire	

우리는 이러한 5MW급 풍력발전기의 작업환경을 고려하여(블레이드의 단면을 고려하여) 그림 7과 같이 로봇의 크기를 5.4m×6.4m로 설정하였다. 로봇은 와이어를 이용해 작업공간(블레이드)을 이동하며 이동시 로봇의 블레이드 고정자(L13, L14, L15, L16)가 블레이드를 잡아준다. 고정자는 스프링 댐퍼로 이루어져 있어 네 방향에서 블레이드를 잡기 때문에 블레이드의 다양한 단면을 적절히 잡을 수 있다. 이 때문에 로봇의 x축, y축 이동 및 Yaw방향(z축) 회전을 감소 시켜준다. 또한, 로봇이 블레이드를 부드럽게 잡고 내려가도록 하기 위해 블레이드 끝단에 풀러를 부착하였다.

시뮬레이션 환경에서 와이어의 움직임 표현하기 위해 와이어가 접하는데 귀퉁이 부분은 Spherical 관절(B5, B6, B7, B8)로 설정한다. 로봇을 지지해주는 와이어는 스프링과 댐퍼를 가지는 선형탄성 구동기(L5, L6, L7, L8)로 가정한다.

로봇을 제어하기 위해 Force/Torque(F/T)센서와 IMU (Inertia Measurement Unit)센서 그리고 Encoder를 이용한다. F/T 센서는 로봇에 의해 와이어에 가해지는 힘을 측정하고 Encoder는 와이어의 길이를 측정하는데 사용한다. IMU 센서는 로봇의 자세를 측정하는데 사용한다. 표 3은 그림 7의 로봇 모델 및 로봇에 사용되는 구동기와 센서들을 설명한다.

3. 변위 발생기 모델

실제 해상풍력발전기가 작동하는 환경은 바다 위 이므로 돌풍과 파도의 영향을 배제 할 수 없다. 돌풍과 같은 외란은 해상풍력발전기의 블레이드와 로봇의 변위를 발생시킨다. 이러한 점 때문에 이미 해상풍력발전기에는 돌풍과 같은 외력의 영향을 고려하여 설계가 되어 있다. 따라서 블레이드는 고정되어 있고 로봇만 흔들린다고 가정할 수 있다. 시뮬레이션상에서 돌풍과 같은 유체의 흐름은 표현하기 어려우므로 외력을 가해 줄 수 있는 모델이 필요하다. 해상풍력발전기의 나셀 부분을 그림 8과 같은 형태로 수정하여 외란 발생기 모델링한다. 본 외란 발생기는 Roll 방향 (Disturbance1) 및 Pitch 방향 (Disturbance2)의 외란을 발생시킨다.

4. 최종 시뮬레이션 로봇 모델

최종 시뮬레이션 로봇은 변위 발생기와 로봇 크게 두 부분으로 구성 되어 있다. 변위 발생기는 실제 해상 환경에서의 돌풍과 파랑 같은 외력을 구현해 주고, 로봇은 자세를 유지하며 블레이드 전구간을 따라 이동하면서 청결 및 유지보수의 활동을 한다.

그림 8. 외란 발생기 모델.

Fig. 8. Disturbance generator.

그림 9. 최종 시뮬레이션 모델.
Fig. 9. Final simulation model.

그림 10. 시뮬레이션 작동 모습.
Fig. 10. Simulation in progress.

해상풍력발전기의 3개의 블레이드는 모두 동일하므로 간략화 시켜 하나의 블레이드 위에 모델링 시켰다. 그림 9는 블레이드와 변위 발생기 모델이며 로봇이 결합된 최종 시뮬레이션 모델이다. 그림 10에서는 시뮬레이션을 하는 모습이며, 고정자를 사용하지 않고 작동을 한 모습을 보여준다.

III. ATTITUDE CONTROLLER CONFIGURATION

1. 전체 제어 알고리즘

시뮬레이션을 하는 모델의 가장 중요한 점은 외란에 관계없이 균형을 유지하며 블레이드 전체를 이동할 수 있는 것이다. 외란에 대해 로봇이 움직일 수 있는 방향은 6가지 방향으로 z축 운동(높이), Roll 회전, Pitch 회전, Yaw 회전, x축 운동, 그리고 y축 운동이다. 이중 Yaw 회전과 x축 운동, y축 운동은 블레이드 고정자로 인해서 움직임이 제한되므로, 제어 알고리즘에서 고려하지 않는다. 남은 Roll 회전, Pitch 회전, 그리고 z축 운동(높이)에 대해서만 제어를 고려한다.

전체적인 제어 알고리즘의 구성은 그림 11과 같이 Roll 회전, Pitch 회전, 높이 운동을 각각 독립적으로 제어한 후 제어된 입력 값을 중첩하여 로봇의 구동기에 입력하도록 한다. 각각의 제어기를 Roll Attitude Controller, Pitch Attitude Controller,

그림 11. 시스템 제어 블록 다이어그램.
Fig. 11. System block diagram.

그리고 Height Controller라 명명한다. 그리고 이 로봇을 제어하기 위해 PD 제어를 사용하였다. 이 제어는 응용분야에서 가장 많이 사용되고 있는 방법으로 PD 제어를 사용한 이유는 P 제어보다 응답속도가 빠르고 과도 응답의 특성을 개선시킬 수 있기 때문이다.

f_0 는 Roll 자세 제어기의 입력, f_θ 는 Pitch 자세제어기의 입력 그리고 f_z 는 높이 제어기의 입력이다. 각 구동기에 대한 최종 입력 값은 식 (1)-(4)에 나타나있는 것과 같이 각각의 입력을 합친 값이 된다.

$$f_5 = f_{05} + f_{05} + f_{z5} \quad (1)$$

$$f_6 = f_{06} + f_{06} + f_{z6} \quad (2)$$

$$f_7 = f_{07} + f_{07} + f_{z7} \quad (3)$$

$$f_8 = f_{08} + f_{08} + f_{z8} \quad (4)$$

여기서 f_5, f_6, f_7 그리고 f_8 은 각각 와이어 L5, L6, L7 그리고 L8을 제어하는 구동 힘을 의미한다

2. Roll attitude control

로봇이 외란을 받아 Roll 방향으로 기울어지면 그림 12와 같은 모습을 갖는다. 그림 12의 로봇의 모습을 도식화하면 그림 13과 같다. 로봇이 수평의 자세가 되기 위해서는 L5와 L8은 와이어가 당겨지고 L6와 L7 와이어가 느슨해져야 한다. Roll 방향의 외란이 가해졌을 때, PD 제어를 바탕으로 로봇의 수평을 유지하도록 한다. 와이어 L5와 L8에 그리고 와이어 L6와 L7에 동일한 입력이 각각 식 (5)와 (6)처럼 가해진다.

$$f_{05} = f_{08} = kp(\theta_d - \theta) + kd(0 - \dot{\theta}) \quad (5)$$

$$f_{06} = f_{07} = -kp(\theta_d - \theta) - kd(0 - \dot{\theta}) \quad (6)$$

여기서 θ_d 값은 0이며 θ 값은 IMU로 읽은 로봇의 Roll 각도이다. 또한 kp 와 kd 의 PD 제어기의 이득이며 실험적으로 구해진다.

그림 12. Roll 방향 자세 제어.
Fig. 12. A roll attitude control.

그림 13. Roll Attitude Control 도식화.

Fig. 13. Simple model of the roll attitude control.

그림 14. Pitch 방향 자세 제어.

Fig. 14. A pitch attitude control.

그림 15. Pitch Attitude Control 도식화.

Fig. 15. Simple model of the pitch attitude control.

3. Pitch attitude control

Roll 방향 제어와 같은 방식으로 제어한다. 그림 14를 보지만 회전축의 축 방향이 달라졌다. 그림 15는 그림 14를 도식화 한 것이다. 회전의 기준 축이 달라졌으므로 제어를 하는 와이어도 달라진다. Pitch Attitude Control은 L7과 L8, L5와 L6를 세트스로 두고 제어를 한다. 역시 PD 제어를 하며 세트 별로 동일한 입력 식 (7), 식 (8)을 부여한다.

$$f_{\phi 5} = f_{\phi 6} = -kp(\phi_d - \phi) - kd(0 - \dot{\phi}) \quad (7)$$

$$f_{\phi 7} = f_{\phi 8} = kp(\phi_d - \phi) + kd(0 - \dot{\phi}) \quad (8)$$

여기서 kp 와 kd 의 PD 제어기의 게인이고, ϕ_d 값은 0이며 ϕ 값은 IMU로 읽은 로봇의 Pitch 각도이다.

4. Height control

로봇의 높이제어는 4개의 와이어가 1개의 와이어처럼 움직인다는 가정하에 제어를 한다. 그림 16의 도식화된 그림은 그림 17과 같이 질량 m 이 Linear Actuator에 달려 있는 모델처럼 간소화시킬 수 있다. 이때 질량 m 의 높이 제어는 PD 제어를 사용하여 식 (9)처럼 만든다. 식 우항의 mg 는 중력보상을 의미한다.

$$f_z = (kp(z_d - z) + kd(0 - \dot{z}) + mg) \quad (9)$$

4개의 와이어가 1개처럼 움직인다는 가정으로 각 와이어는 동일하게 구동시켰다. 여기서 각 와이어의 구동은 식 (10)과 식 (11)같이 표현할 수 있다.

$$f_{z5} = f_{z6} = f_{z7} = f_{z8} \quad (10)$$

$$f_z = f_{z5} + f_{z6} + f_{z7} + f_{z8} \quad (11)$$

따라서, 각 구동기에 걸리는 입력은 식 (12)와 같다.

그림 16. 높이 제어.

Fig. 16. A height control.

그림 17. Height Control 도식화.

Fig. 17. Simple model of the height control.

$$f_5 = f_6 = f_7 = f_8 = \frac{(kp(z_d - z) + kd(0 - \dot{z}) + mg)}{4} \quad (12)$$

IV. EXPERIMENT

III장에서 설계한 제어기를 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다. 또한 실험 하기 위해 각 제어기에 사용한 제어기 이득은 표 4와 같다.

1. 초기조건에 대한 자세제어 및 높이제어 실험

앞서 III장에서 설명했듯이 우리는 로봇이 Roll, Pitch, 높이 방향에 대하여 각각 제어가 독립적으로 가능하며 독립 제어된 변수들을 중첩하여 시스템 전체를 제어할 수 있다고 설명했다. 본 4.1에서는 각각의 요소에 초기 에러가 있을 때 III장에서 설계한 제어기의 성능을 검증하였다.

1.1 Roll 방향 자세제어

초기 Roll의 각도가 3도인 로봇에 8초가 되는 순간 자세제어기를 작동시키도록 하였다. 로봇은 그림 18과 같이 L5와 L8 와이어길이는 늘려주고 L6과 L7와이어 길이는 줄여주는

표 4. 각 제어기별 kp , kd 의 실험값.

Table 4. The gain of controllers in the simulation.

	Roll Attitude Control	Pitch Attitude Control	Height Control
kp	10000	10000	10000
kd	7482.18	6323.60	3405.36

그림 18. 와이어 길이 변화 (Roll Attitude Control).
Fig. 18. Simulation result of the roll attitude control: wire length.

그림 19. Roll 각도 변화.
Fig. 19. Simulation result of the roll attitude control: roll angle.

그림 20. 와이어 길이 변화 (Pitch Attitude Control).
Fig. 20. Simulation result of the pitch attitude control: wire length.

그림 21. Pitch 각도 변화.
Fig. 21. Simulation result of the pitch attitude control: pitch angle.

그림 22. 와이어 길이 변화 (Height Control).
Fig. 22. Simulation result of the height control: wire length.

그림 23. 로봇의 높이 변화 (Height).
Fig. 23. Simulation result of the height control: height.

것을 통해, 그림 19처럼 3도 기울어진 로봇을 0도로 수평을 유지하게 하는 것을 확인하였다.

1.2 Pitch 방향 자세제어

Roll의 자세제어와 마찬가지로 Pitch의 자세제어도 같은 방법으로 이루어진다. 다만 회전을 행하는 축이 바뀔 뿐이다. Pitch 방향에 초기각도가 3도 기울어져 있고 목표각도가 0도 일 때는 그림 20과 같이 L7과 L8의 와이어가 늘어나고 L5와 L6이 줄어들면서, 그림 21과 같이 기울어져 있던 로봇이 수평 잡는다.

1.3 Height 제어

로봇의 높이를 제어하는 문제는 앞서 설명한 두 제어의 방법과는 상이하다. Roll과 Pitch는 초기각도가 주어진 상태에서 목표 값이 0도로 가는 Regulation의 문제였다면 높이제어는 로봇의 목표 높이에 대한 목표 궤적을 주고 그 값을 따라가게 하는 추적의 문제이다.

높이 제어가 우리 알고리즘으로 제대로 되는지 확인하기 위해 다음과 같이 실험을 수행하였다. 실험결과는 그림 22와 그림 23과 같다. 68.5m의 높이에 위치한 로봇이 1초 동안 69.5m의 높이로 움직이도록 하는 것이다. 이를 위해 목표 궤적은 1-cos 함수로 구성하였으며 빨간색 그래프로 표시하였다. 그림 22는 높이제어기를 적용했을 때 각 와이어의 길이 변화를 보여준다. 그림 23은 로봇의 높이 변화를 보여준다. 그래프에서 파란색 선은 현재 와이어의 길이 및 로봇의 높이를 의미한다.

2. 연속적인 외란에 대한 제어기 실험

4.2에서는 연속적인 외란을 Roll과 Pitch에 가하고 로봇의

그림 24. Roll & Pitch의 연속적인 외란.

Fig. 24. Continuous disturbance of roll and pitch axes.

그림 25. 와이어 길이 변화.

Fig. 25. Simulation result for continuous disturbance: wire length.

그림 26. 로봇의 높이 변화.

Fig. 26. Simulation result for continuous disturbance: height.

그림 27. Roll & Pitch 각도 변화.

Fig. 27. Simulation result for continuous disturbance: roll and pitch angles.

높이를 변화시켜 줄 때에 대해 실험을 수행하여 알고리즘을 검증하였다. 그림 24와 같이, Roll 방향으로로는 진폭이 2.2도이고 주기가 1초인 삼각함수 형태의 외란을 인가하고 Pitch 방향으로로는 진폭이 1.7도이며 주기가 1초인 삼각함수 형태의 외란을 인가하였다. 이와 동시에 로봇은 70m 높이에서 69.5m 높이로 하강하도록 하였다.

그림 25의 와이어 길이변화와 그림 26을 통해 로봇이 $-\frac{1}{2}(1 - \cos \theta)$ 의 목표궤적을 따라 0초에서 1초 사이에 목표값 69.5m로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한, Roll과 Pitch 방향의 외란이 가해지고 있음에도 불구하고 그림 27과 같이 로봇은 Roll, Pitch 모두 0도를 유지하는 것을 볼 수 있다. 이를 통해, III장에서 설계한 자세제어기가 올바르게 구동되는 것을 확인 할 수 있다.

V. CONCLUSION

본 논문은 풍력발전기의 블레이드 유지 보수를 위한 로봇을 언급하고, 돌풍과 같은 외란에 대해 로봇이 균형을 유지하도록 하는 제어를 제안하였다. 블레이드의 크기 및 형태를 고려하여 로봇의 크기를 결정하고 사각형 형태의 외형을 결정하였다. 로봇의 네 꼭지점에 와이어와 모터가 달려 있어 로봇을 구동하며, 로봇에 블레이드 고정자가 달려있어 Yaw 회전과 x축 이동, y축 이동의 움직임을 배제할 수 있도록 해주었다. 또한 Roll, Pitch, and 높이 세가지 요소에 대해서 각각 독립적으로 제어를 하고 이를 중첩하여 전체 시스템을 제어하도록 하였다. 이렇게 III장에서 설계한 제어를 바탕으로 IV장에서 초기 조건에 대한 자세제어 및 연속적인 외란이 가해질 때 자세제어를 했으며 실험결과 자세제어기가 적절하게 구동됨을 확인 할 수 있었다.

다음 연구과제는 로봇이 블레이드에 부착되어 이동하면서 어떻게 블레이드를 깨끗하게 하고 손상감지를 하여 유지보수를 할 것인가에 대하여 연구할 예정이다.

REFERENCE

- [1] S. Gsänger and J. D. Pitteloud, "2012 annual report," *World Wind Energy Association*, May 16, 2013.
- [2] J. K. Sung and T. J. Lee, "Study on present status and future direction of korean offshore wind power," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 62, no. 3, pp. 312-321, Mar. 2013.
- [3] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of 5MW reference wind turbine for offshore system development," *National Renewable Energy Laboratory*, Colorado, NREL/TP-500-38060, Feb. 2009.
- [4] A. C. Hansen, "Yaw dynamics of horizontal axis wind turbines," *NREL A Division of Midwest Res. Inst*, Colorado, NREL/TP-442-4822, Final Rep., May 1992.
- [5] Fraunhofer web page, www.ilt.fraunhofer.de
- [6] C. L. Phillips and H. T. Nagle, *Digital Control System Analysis and Design*, 3rd ed., Prentice Hall Inc, Nov. 1994.
- [7] D. H. Kim, C. S. Kim, and N. H. Kyong, "A study on the design of database to improve the capability of managing offshore wind power plant," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, vol. 30, no. 3, pp. 65-70, 2010.
- [8] D. A. Spera, *Wind Turbine Technology*, 2nd Ed., American

Society of Mechanical, 1994.

- [9] P. M. Anderson, "Stability simulation of wind turbine systems," *IEEE Trans. Power App. Syst. (until 1985)*, vol. PAS-102, no. 12, Dec. 1983.
- [10] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Sáenz, "Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 18, no. 2, Jun. 2003.
- [11] D. M. Eggleston and F. S. Stoddard, *Wind turbine engineering design*, Van Nostrand Reinhold, Jul. 31, 1987.
- [12] E. Muljadi and C. P. Butterfield, "Pitch-controlled variable-speed wind turbine generation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 1, Jan./Feb. 2001.
- [13] E. S. Abdin and W. Xu, "Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 15, no. 1, Mar. 2004.

공진영

2014년 국민대학교 기계시스템전공(공학사).

이재순

2014년 국민대학교 기계시스템전공(공학사). 2014년~현재 국민대학교 대학원 기계설계과 석사과정 재학중. 관심분야는 로봇제어, 휴머노이드 로봇, 재활로봇.

강연식

1999년 서울대학교 조선해양공학과(공학사). 2001년 서울대학교 조선해양공학과(공학석사). 2006년 미국 University of California Berkeley 기계공학과(공학박사). 2006년~2007년 미국 University of California Berkeley 박사후 과정. 2007년~2010년 한국과학기술원(KIST)인지로봇연구단 선임연구원. 2010년~현재 국민대학교 자동차IT융합학과 조교수.

조백규

2002년, 2004년, 2009년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과(공학사, 공학석사, 공학박사). 2009년 일본 ATR (Advanced Telecommunications Research Institute International) 박사후 과정. 2011년 미국 카네기 멜론 대학교 Robotics Institute에서 박사 후 과정. 2011년 8월~현재 국민대학교 기계시스템공학부 조교수. 관심분야는 재활로봇/근력증강로봇, 휴머노이드 로봇, 보행 및 주행 알고리즘 개발, 로봇 설계 및 제어.