



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](#)

공학석사 학위논문

가변 피치형 부유식 수직축 풍력발전기의  
발전효율에 관한 연구

A Study on Efficiency of a Vertical Axis and  
Variable-Pitch Floating Wind Turbine



지도교수 조 효 제

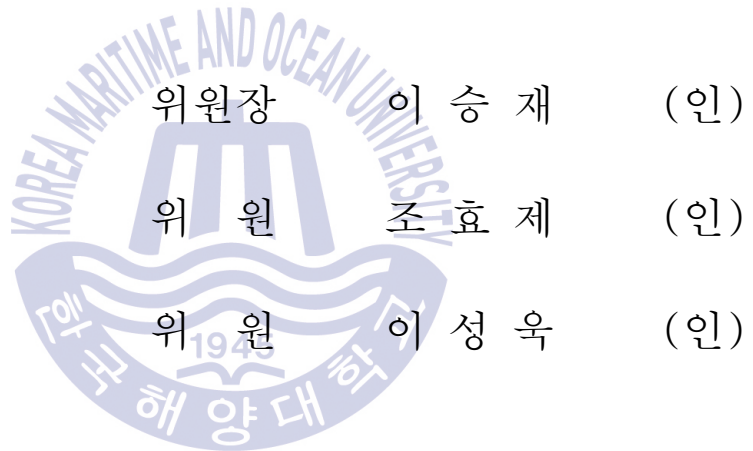
2017년 2월

한국해양대학교 대학원

조선해양시스템공학과

김 재 희

본 논문을 김재희의 공학석사 학위논문으로 인준함.



2017년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vii

## 1. 서 론

1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구내용 .....	4

## 2. 풍력발전 시스템

2.1 풍력발전 시스템 개요 .....	5
2.2 수평축 및 수직축 풍력발전기 비교 .....	7
2.3 풍력발전 에너지 이론 .....	10

## 3. 모형 설계 및 제작

3.1 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 풍력발전기 형상 설계 .....	12
3.1.1 블레이드 .....	13
3.1.2 스토포퍼 장치 .....	14
3.1.3 블레이드 상·하판 및 중심축 .....	16
3.1.4 지지대 .....	19
3.2 해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험용 풍력발전기 형상 설계 ..	20
3.2.1 부유체 .....	21
3.2.2 지지대 .....	22

<b>4. 모형실험</b>	
4.1 실험 측정 기기 및 풍동실험 환경 조성 .....	23
4.1.1 풍속 측정 및 풍동실험 .....	30
4.1.2 기계적 출력 실험 장비 .....	32
4.2 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험 .....	33
4.3 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험 결과에 대한 고찰 .....	41
4.4 해양 공학수조를 이용한 풍력발전 실험 .....	60
4.5 해양 공학수조를 이용한 풍력발전 실험 결과에 대한 고찰 .....	65
<b>5. 결론 및 향후과제</b> .....	70
<b>References</b> .....	71



## List of Tables

Table 3.1	Specification of blades .....	13
Table 3.2	Specification of the top and bottom plates .....	16
Table 3.3	Specification of the main column .....	18
Table 3.4	Specification of the support fixture .....	19
Table 3.5	Specification of the floating body .....	21
Table 3.6	Specification of the support fixture .....	22
Table 4.1	Specifications of the RPM sensor .....	23
Table 4.2	Specifications of the torque meter .....	24
Table 4.3	Specifications of the wind meter .....	25
Table 4.4	Specifications of the stepping motor .....	26
Table 4.5	Specifications of the coupling .....	27
Table 4.6	Specifications of the wind meter .....	28
Table 4.7	Specifications of the RPM sensor .....	29
Table 4.8	Design parameters for experimental condition .....	39
Table 4.9	Specifications of wind generating system in RIMS .....	63
Table 4.10	Design parameters for experimental condition .....	64

## List of Figures

Fig. 1.1 Average size of offshore wind farm projects .....	2
Fig. 1.2 Average water depth and distance to shore of online, under construction and consented wind farms .....	2
Fig. 2.1 Components of a wind turbine .....	6
Fig. 2.2 Type of the VAWT .....	8
Fig. 2.3 Type of the HAWT .....	9
Fig. 3.1 2D modeling and prototype of the wind turbine .....	12
Fig. 3.2 2D modeling and prototype of blades .....	13
Fig. 3.3 Prototype of the stopper units .....	14
Fig. 3.4 2D modeling of the stopper units .....	15
Fig. 3.5 2D modeling and prototype of the top and bottom plates .....	16
Fig. 3.6 2D modeling of the main column .....	17
Fig. 3.7 Prototype of the main column .....	18
Fig. 3.8 2D modeling and prototype of the support fixture .....	19
Fig. 3.9 2D modeling and prototype of the floating wind turbine .....	20
Fig. 3.10 2D modeling and prototype of the floating body .....	21
Fig. 3.11 2D modeling and prototype of the support fixture .....	22
Fig. 4.1 RPM sensor .....	23
Fig. 4.2 Torque meter .....	24
Fig. 4.3 Wind meter .....	25
Fig. 4.4 Stepping motor .....	26
Fig. 4.5 Coupling .....	27
Fig. 4.6 Wind meter .....	28
Fig. 4.7 RPM sensor .....	29
Fig. 4.8 Wind tunnel – the wind tunnel system using a 2-dimensional basin	30
Fig. 4.9 Anemometry and experiment of the wind turbine .....	31
Fig. 4.10 Mechanical measuring systems .....	32
Fig. 4.11 Variable-pitch range of the blade .....	36
Fig. 4.12 Fixed pitch angle of the blade – case 1 ~ case 7 .....	37
Fig. 4.13 Fixed pitch angle of the blade – case 8 ~ case 15 .....	38

<b>Fig. 4.14</b>	The RPM by the wind speed following variable-pitch range in no load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5 .....	43
<b>Fig. 4.15</b>	The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in no load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7 .....	44
<b>Fig. 4.16</b>	The RPM by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5 .....	45
<b>Fig. 4.17</b>	The torque by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5 .....	46
<b>Fig. 4.18</b>	The power by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5 .....	47
<b>Fig. 4.19</b>	The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7 .....	48
<b>Fig. 4.20</b>	The torque by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7 .....	49
<b>Fig. 4.21</b>	The power by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7 .....	50
<b>Fig. 4.22</b>	The RPM by the wind speed following variable-pitch range in no load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9 .....	51
<b>Fig. 4.23</b>	The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in no load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15 .....	52
<b>Fig. 4.24</b>	The RPM by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9 .....	53
<b>Fig. 4.25</b>	The torque by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9 .....	54
<b>Fig. 4.26</b>	The power by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9 .....	55
<b>Fig. 4.27</b>	The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15 .....	56
<b>Fig. 4.28</b>	The torque by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15 .....	57
<b>Fig. 4.29</b>	The power by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15 .....	58
<b>Fig. 4.30</b>	The condition of blades by the positions following variable-pitch	



range from $-10^{\circ}$ ~ $+105^{\circ}$ .....	59
<b>Fig. 4.31</b> The wind turbine test is used with the ocean engineering basin - fixed wind turbine .....	61
<b>Fig. 4.32</b> The wind turbine test is used with the ocean engineering basin - non fixed wind turbine .....	62
<b>Fig. 4.33</b> Wind generating system in RIMS .....	63
<b>Fig. 4.34</b> The RPM time history by the wind speed following variable - pitch range $-15^{\circ}$ ~ $+65^{\circ}$ in the fixed wind turbine condition .....	66
<b>Fig. 4.35</b> The RPM time history by the wind speed following variable - pitch range $-10^{\circ}$ ~ $+105^{\circ}$ in the fixed wind turbine condition .....	66
<b>Fig. 4.36</b> The RPM by the wind speed following variable-pitch range in the fixed wind turbine condition .....	67
<b>Fig. 4.37</b> Measured heave response of floating VAWT in regular waves ·	68
<b>Fig. 4.38</b> The RPM by the wave following the wind speed 8 <i>m/s</i> and variable-pitch range $-10^{\circ}$ ~ $+105^{\circ}$ .....	69



# A Study on Efficiency of a Vertical Axis and Variable-Pitch Floating Wind Turbine

Kim Jae-Heui

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

This thesis is for the research of generating efficiency of the vertical axis and variable-pitch floating wind turbine. This new concept wind turbine is designed to have variable pitch angles while the rotor blade is rotating with the direction of the wind. For the most efficient wind turbine design, I analyzed output characters from the integration between the blade's variable-pitch range, fixed pitch angle, external force of ocean environment and the wind turbine through a wind tunnel test using 2-dimensional basin as well as the floating wind turbine test using the ocean engineering basin. Also, when evaluating for the mechanical efficiency (disregarding the electric efficiency) of the wind turbine, I performed a mechanical power measuring test of torque and the RPM of the generator's pivot.

**KEY WORDS:** Variable-pitch; 가변 피치, Vertical axis wind turbine; 수직축 풍력발전기, Model test; 모형시험, Floating wind turbine test; 부유식 풍력실험, Mechanical power measuring test; 기계적 출력 실험

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경

최근 무분별한 화석 에너지 사용에 따른 화석 에너지 자원 고갈 및 지구온난화 문제로 인해 전 세계적으로 신재생 에너지에 관한 관심과 수요가 증대되었다. 이에 따라 대체 에너지로서 풍력 에너지, 태양 에너지, 파력 에너지, 조력 에너지 등이 연구개발 되고 있다.

풍력 에너지는 한때 경제적 효율성을 갖추지 못해 주목받지 못했지만, 오늘날 관련 기술의 발달로 효율성이 증대됨으로써 세계 여러 나라에서 주목하고 있다. 특히 유럽 및 미국과 같은 기술 선진국에서는 이미 소형풍력발전 시스템에서부터 5 MW급의 대용량 풍력 발전 시스템까지도 개발할 수 있는 기술적인 발전을 이룩하였다. [1]

우리나라의 풍력발전기의 기술개발 부분에서는 2000년 초 이후 750 kW급 풍력발전기의 국산화를 추진하여 블레이드, 발전기 등 요소기술의 설계, 제작 능력을 확보하여 상업화에 성공하였다. 이후 2009년에는 3 MW급 해상 풍력발전시스템의 개발이 완료되었고 5 MW급 이상의 대형 해상 풍력발전 시스템 또한 개발이 완료되어 실증 단계에 있다. [2]

이러한 기술발전에 따른 풍력발전기의 대형화는 소음, 전파 등 거주 환경 및 민원문제를 발생시킨다. 더구나 우리나라의 협소한 국토로 인한 육상풍력발전 보급의 제한은 풍부한 부지, 양질의 풍력자원을 이용할 수 있는 해상풍력발전 에 관한 관심을 증대시켰다. 특히 후쿠시마 원전 사고는 대체 에너지 및 해상 풍력에 대한 필요성을 더욱 증가시키는 계기가 되었다.

2013년 유럽 전체 해상풍력발전기의 평균 발전설비 용량은 482 MW로 2012년

286 MW에 비해 크게 증가한 것으로 조사되었다. 또한 해상풍력발전기의 설치 해역은 점점 더 깊은 곳으로 이동하고 있는데 2013년 해상풍력발전기의 평균 설치 수심은 16 m, 해안으로부터 해상풍력발전소까지의 평균 거리는 29 km이다. [3]

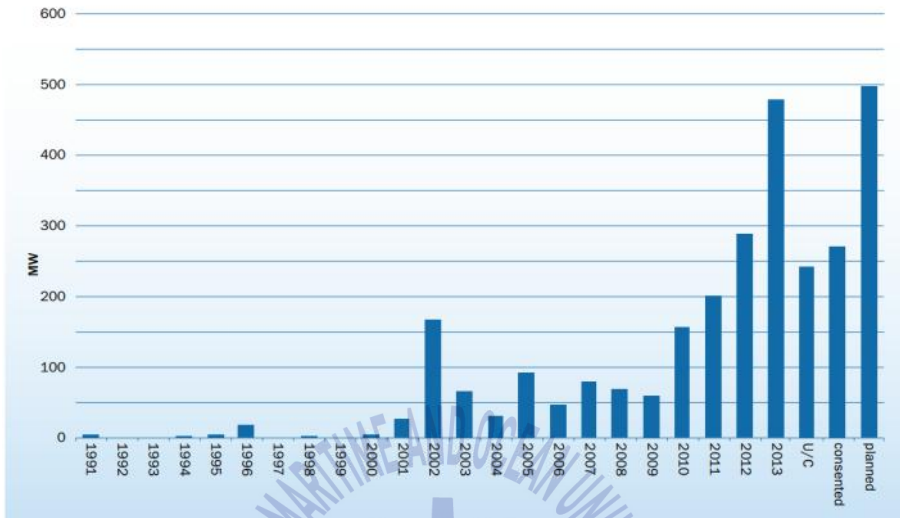


Fig. 1.1 Average size of offshore wind farm projects

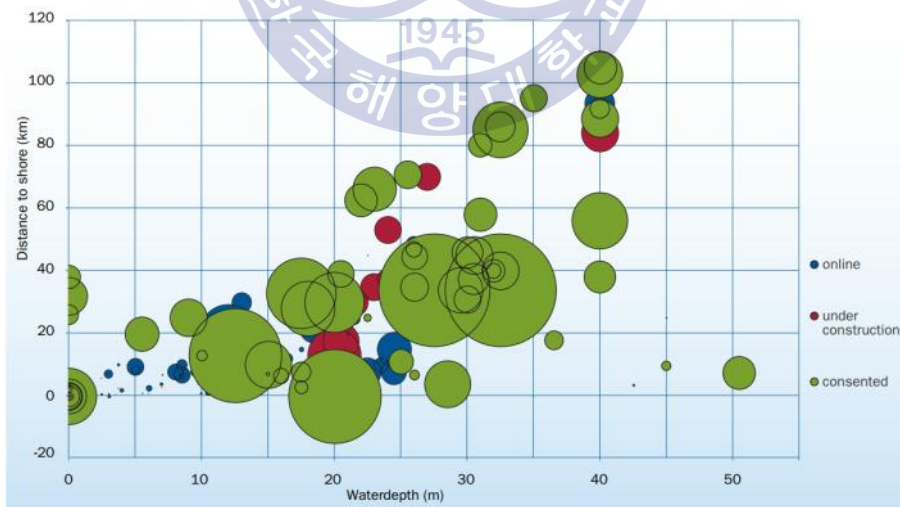


Fig. 1.2 Average water depth and distance to shore of online, under construction and consented wind farms

기존의 연구사례를 보면 부유식 수직축 풍력 발전기의 공력해석 및 실험에 대한 연구사례가 발표되고 있지만, 로터가 회전하는 동시에 바람의 방향에 따라 블레이드의 피치각이 변하도록 설계되고, 해양 환경 하중에서 가변 피치형 수직축 풍력발전기의 발전효율 및 동적거동을 체계적으로 파악한 연구사례는 찾아보기 힘들었다.

Robert E. Sheldahl et al. (1981)은 수직축 풍력발전기의 운용 중  $0 \sim 180$  deg의 받음각 영역에서 서로 다른 에어포일을 적용하였을 때 레이놀즈수에 따른 공력특성에 대하여 연구하였다.

공창덕 외 (1998)은  $500$  kW급 수평축 풍력발전기용 블레이드의 시제품 제작에 앞서 이론적 공력 성능과 실측 공력 성능을 비교하는 실험을 수행하였다. 이때 축소 모델을 이용한 실험에서 토크 측정장치, RPM 측정장치, 스트레인 측정장치, 제동장치 등으로 구성된 실험 장치를 이용하여 풍력실험을 수행하였다.

Robert E. Sheldahl (1981)은 직경  $2$  m의 NACA-0012 에어포일 블레이드를 가진 다리우스형 VAWT에 대한 출력 특성을 풍력실험을 통하여 연구를 수행하였다.

Martin H. R. (2011)은 다양한 부유식 풍력발전기 시뮬레이션 코드를 검증하기 위한 data를 수집하기 위해서 NREL  $5$  MW급 블레이드를 이용한 해상용 풍력발전기를  $1/50$ 으로 축소 제작하여 실험을 수행하였다.

Manabu TAKAO et al. (2008)은 Guide Vane를 장착한 H-type의 Straight-bladed VAWT의 출력성능에 대한 경향을 풍동실험을 통해 연구하였다.

최현철 외 (2010)은 해양용 부이의 전원 공급용으로 최적화된 소형 수직축 풍력발전기를 설계하였다. 과도로 인한 부이의 기울어짐 효과를 고려하여 안정성 해석 및 풍속에 따른 출력성능에 대해 연구를 수행하였다.

김민수 외 (2011)은 부유식 해상 풍력발전기의 성능을 평가하기 위하여 출력 성능, 하중, 소음, 전력품질 등 국제 전기표준회의의 규격을 따르는 항목 이외에 파랑 및 바람중의 운동성능을 추가하기 위하여  $5$  MW급 스파(Spar)형식의 부유식 해상 풍력발전기의 운동성능을 수치해석과 모형시험 결과를 비교 분석하는 연구를 수행하였다.

## 1.2 연구내용

본 연구에서는 가변 피치형 부유식 수직축 풍력발전기의 발전 효율 및 해양 환경 하중에 의한 동적거동을 체계적으로 파악하고 부유체의 동적거동과 발전 효율 간의 상호작용을 분석하였다.

해양 환경 하중인 해상풍, 해양파에 의한 부유체의 동적거동과 발전효율 간의 상호작용 그리고 가변 피치형 부유식 수직축 풍력발전기의 단독 특성은 컴퓨터 프로그램을 이용한 수치해석으로는 파악하기 힘들기 때문에 축소 모형을 제작하여 한국해양대학교 해양시스템연구실의 2차원 조파수조와 중소조선연구원의 해양 공학수조에서 실험을 수행하였다.

2차원 조파수조를 이용한 풍동실험에서는 가변 피치형 수직축 풍력발전기를 축소 제작하고, 분당회전속도(RPM, Revolution per minute) & 토크(Torque)측정기와 부하장치인 스텝핑 모터(Stepping motor)로 구성된 기계적 출력 실험 시스템을 풍력발전기에 설치하여 출력을 측정하였다. 실험변수인 블레이드 고정 각도, 피치 가변 범위, 부하 여부를 통해 가변 피치형 수직축 풍력발전기의 단독 특성을 파악하였다.

해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험에서는 스파 타입의 부유체 상단에 가변 피치형 수직축 풍력발전기가 결합된 축소 모형을 제작하고, 실제 해상상황을 재현한 후 모형실험을 실시하였다. 해양 공학수조를 이용한 실험에서는 비접촉식 RPM측정기를 설치하여 풍력발전기의 RPM을 측정하였다. 실험변수인 피치 가변 범위, 풍력 발전기 고정 여부 및 입사파의 변화에 따른 출력과 동적거동을 측정하여 가변 피치형 풍력발전기의 발전효율과 부유체의 동적거동 간의 상호작용 및 안정성을 분석하였다.

## 제 2 장 풍력발전 시스템

### 2.1 풍력발전 시스템 개요

풍력발전이란 바람이 갖는 운동에너지(Wind kinetic energy)를 터빈을 통해 기계적 에너지로 변환시키고, 다시 이를 전기에너지 혹은 다른 에너지로 변환시키는 것을 말한다. 보통 시동풍속(Cut-in wind speed)과 정격풍속(Rated wind speed) 사이에서 풍속의 세제곱과 터빈의 면적에 비례하는 에너지량으로 변환되게 되고 정지풍속(Cut-out wind speed)까지 일정한 출력이 유지되다가 그 이상이 되면 시스템의 안전을 위하여 멈추도록 설계된다. [2]

풍력발전기의 분류는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 회전축의 방향에 따라 수평축 풍력발전기(Horizontal axis wind turbine, HAWT)와 수직축 풍력발전기(Vertical axis wind turbine, VAWT)로 설치 장소에 따라 육상 풍력발전기(Onshore)와 해상 풍력발전기(Offshore)로 분류하였다. 이 외에도 풍력발전기의 날개형상과 이용하는 힘에 따라 항력형과 양력형, 설비용량에 따라 대형과 소형, 출력제어 방식에 따라 피치제어 방식과 실속제어 방식으로 분류할 수 있다.

풍력발전기의 주요 구성요소는 Fig. 2.1과 같이 블레이드(Blade), 블레이드를 연결하는 허브(Hub), 로터의 회전력을 증속기에 전달하는 주축(Main shaft), 회전력을 전기로 바꾸는 발전기(Generator), 저회전 고토크의 회전을 고회전 저토크의 회전으로 변환하는 증속기(Gearbox), 블레이드의 피치각을 조절하는 피치 시스템(Pitch system), 풍력발전기를 제어하는 제어/모니터링 시스템, 나셀을 바람이 부는 방향으로 일치시키는 요 시스템(Yaw system), 풍력발전기를 지지하는 타워 등으로 이루어져 있다. [4]



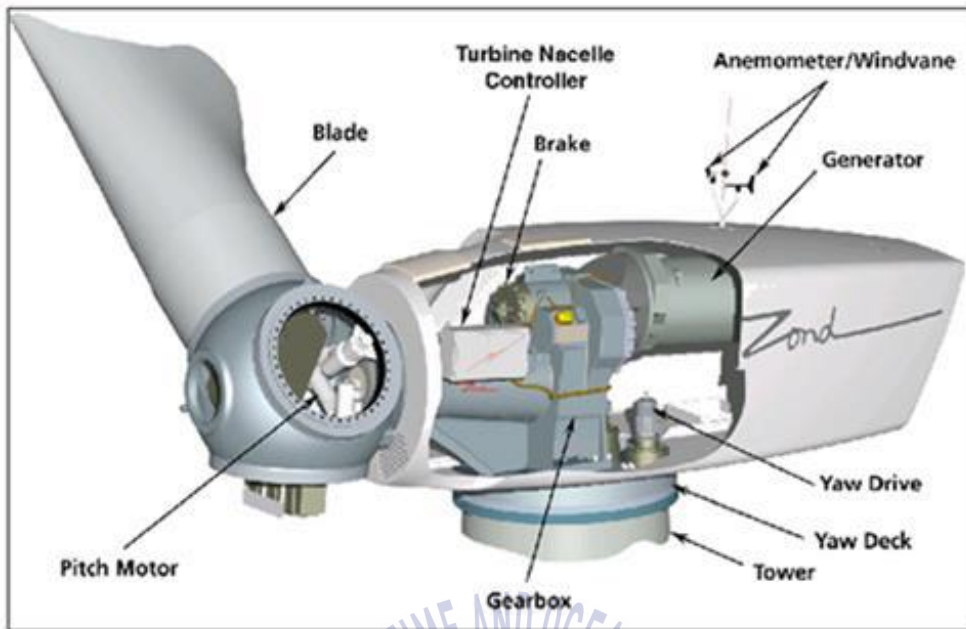


Fig. 2.1 Components of a wind turbine

그 중 블레이드는 풍력을 회전에너지로 변환시키는 풍력발전시스템의 구성요소로, 외형은 공기역학적 에어포일(Airfoil) 형상을 갖고 있다. 일정속도 이상의 바람이 불면, 에어포일에서 발생하는 양력이 블레이드를 회전시키게 되며, 이 회전력을 이용하여 블레이드를 지지하는 허브와 중앙 지지부에 연결된 발전기로부터 전기를 생산하게 된다.



## 2.2 수평축 및 수직축 풍력발전기 비교

풍력발전기는 회전축의 방향과 형상에 따라 크게 2가지 수평축 풍력발전기(Horizontal Axis Wind Turbine, HAWT)와 수직축 풍력발전기(Vertical Axis Wind Turbine, VAWT)로 분류할 수 있다. 수평축 풍력발전기는 풍향에 대해서 회전축이 평행한 것을 말하고 수직축 풍력발전기는 풍향에 대해서 회전축이 수직인 것을 말한다.

수평축 풍력발전기는 수직축 풍력발전기에 비해 풍속대비 출력 효율이 높은 장점을 가지고 있다. 그러나 바람을 받는 날개의 면이 바람이 부는 방향과 일치해야 하며 바람의 방향에 따라 대응이 가능한 요 시스템(Yaw system) 혹은 꼬리날개가 필요하다. 이러한 요 시스템으로 인해서 구조가 복잡해지는 단점을 갖는다.

수직축 풍력발전기는 풍향과 관계없이 작동하므로 요 시스템이 필요하지 않아 저풍속의 바람에서도 풍향에 관계없이 발전이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 풍속과 풍향이 일정하지 않은 지역에 적합하다. 특히 우리나라처럼 기후 변화가 심하고 계절풍의 영향을 받는 지역은 수직축 풍력발전기가 수평축 풍력발전기에 비해 더 유용하다. [5]

수직축 풍력발전기의 종류는 Fig. 2.2와 같다.

- 사보니우스형(Savonius type) : 반 원통형의 2장의 날개를 마주보게 하여 구동하는 구조이며 바람의 항력을 주로 이용한다. 기동 토크가 크고 회전수가 낮은 특징을 가지고 있다.
- 자이로밀형(Gyromill type) : 수직의 대칭익형 블레이드가 풍향에 대하여 자동적으로 최적의 받음각을 얻는 구조를 갖는다. 기동토크가 매우 작아 정지상태에서 자력으로 회전하기 어렵고 구조적으로 조금 복잡하다는 단점이 있지만 효율이 높은 것이 특징이다.
- 다리우스형(Darrieus type) : 일정한 단면형상의 원호형상 날개가 수직축으로 2 ~ 3개 붙인 특이한 구조를 갖는다. 현대의 대표적인 양력형 수직축 풍력발전기로써 회전수가 매우 큰 것이 특징이다.



(a) Savonius type



(b) Gyromill type



(c) Darrieus type

Fig. 2.2 Type of the VAWT

수평축 풍력발전기의 종류는 Fig. 2.3과 같다.

- 프로펠러형(Propeller type) : 현재 풍력발전기용으로 가장 많이 사용되고 있다. 날개의 형태는 항공기 날개와 유사하며 2 ~ 3개의 블레이드로 구성된 시스템이 주로 사용된다.
- 다익형(Multi-bladed type) : 20개 정도의 블레이드를 갖는 전형적인 저회전 대토크형으로써 피스톤 펌프 같은 부하와 잘 맞는다.

- 네델란드형(Netherlands type) : 문의 창살처럼 만들어진 날개에 천을 씌운 형태로 중세 시대부터 제분 및 배수에 사용되었으며 그 당시에는 인력으로 바람이 불어오는 방향으로 날개를 조작하였다.
- 세일형(Sail type) : 날개의 구조가 삼각형이며 지중해 지방에서 제분 및 배수에 사용되어 왔다.



(a) Propeller type



(b) Multi-bladed type



(c) Netherlands type



(d) Sail type

Fig. 2.3 Type of the HAWT

## 2.3 풍력발전 에너지 이론

바람은 공기라는 질량을 가지는 물질의 운동이므로 운동에너지 공식을 통해 바람에너지를 정의할 수 있다. 공기의 질량  $m$  (kg), 속도  $v$  (m/s), 바람의 운동 에너지를  $E$  라고 하면 식 (2.1)과 같다.

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

바람 방향과 수직인 블레이드의 면적을 가상원판  $A$ 라고 하면, 단위시간당 통과하는 바람의 체적은 풍속과 면적의 곱이 된다. 그리고 질량은 체적과 밀도의 곱으로 질량흐름률(Mass flow rate)  $\frac{dm}{dt}$ 은 공기밀도  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>), 풍속  $v$  (m/s), 면적  $A$  (m<sup>2</sup>)이며 질량은 체적과 밀도의 곱으로 나타내어 식 (2.2)와 같다.

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

공기의 흐름에 의한 에너지 출력은 단위시간당 에너지의 변화량으로 정의되고 운동에너지 식을 출력으로 변화시키면 식 (2.3)과 같다

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

따라서 식 (2.1)에 식 (2.2)를 대입하면 바람에 의한 에너지 출력  $P$  ( $W$ ) 는 식 (2.4)와 같다.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.4)$$

블레이드의 기계적 출력  $P_{mechanical}$  는 토크  $T$  ( $N \cdot m$ ), 풍력발전기의 회전 각속도  $\omega$  ( $rad/s$ )라 하면 식 (2.5)로 정의할 수 있고 분당 회전수 RPM으로 환산하여 계산하면 식 (2.6)과 같다.

$$P_{mechanical} = T \cdot \omega \quad (2.5)$$

$$P_{mechanical} = T \cdot RPM \cdot \frac{\pi}{30} \quad (2.6)$$



## 제 3 장 모형 설계 및 제작

### 3.1 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 풍력발전기 형상 설계

2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 풍력발전기의 설계는 상용 설계 프로그램인 오토캐드 2011(Auto CAD 2011)이 사용되었다. 풍력발전기의 구성은 블레이드(Blade), 블레이드 상·하판(Top and bottom plates), 중심축(Main column), 지지대(Support fixture)로 이루어진다. 블레이드 결합방식은 원형의 블레이드 상·하판에 홀(Hole)을 가공한 후 블레이드 축을 삽입 하도록 설계되었다. 일반적인 수직축 풍력발전기와 다르게 로터의 블레이드가 회전하는 동시에 위치에 따라 최적의 피치각도로 블레이드가 움직이도록 설계되었다. Fig. 3.1은 풍력발전기의 2D 모델링 및 실제 제작 사진이다.

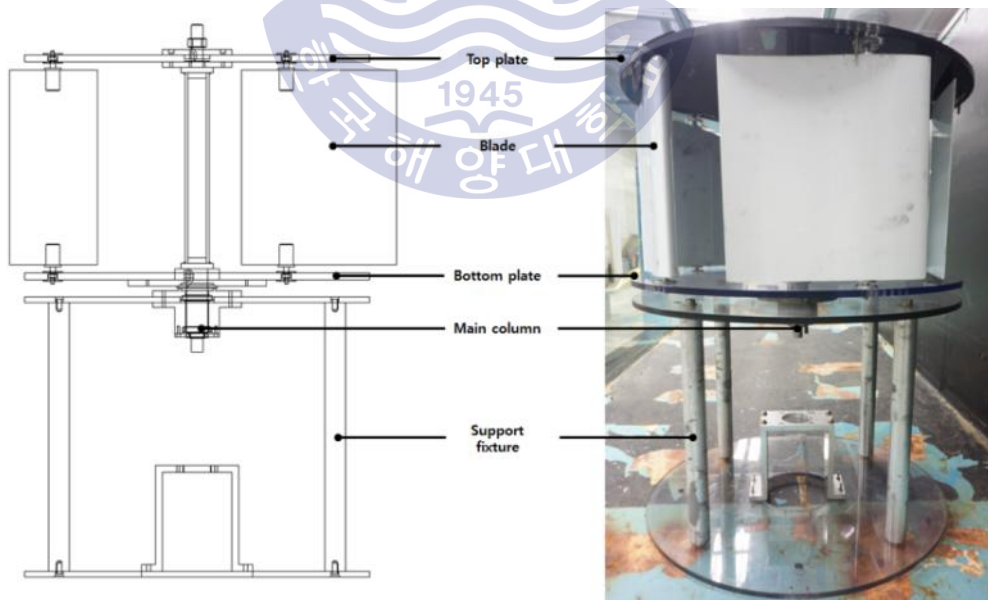


Fig. 3.1 2D modeling and prototype of the wind turbine

### 3.1.1 블레이드

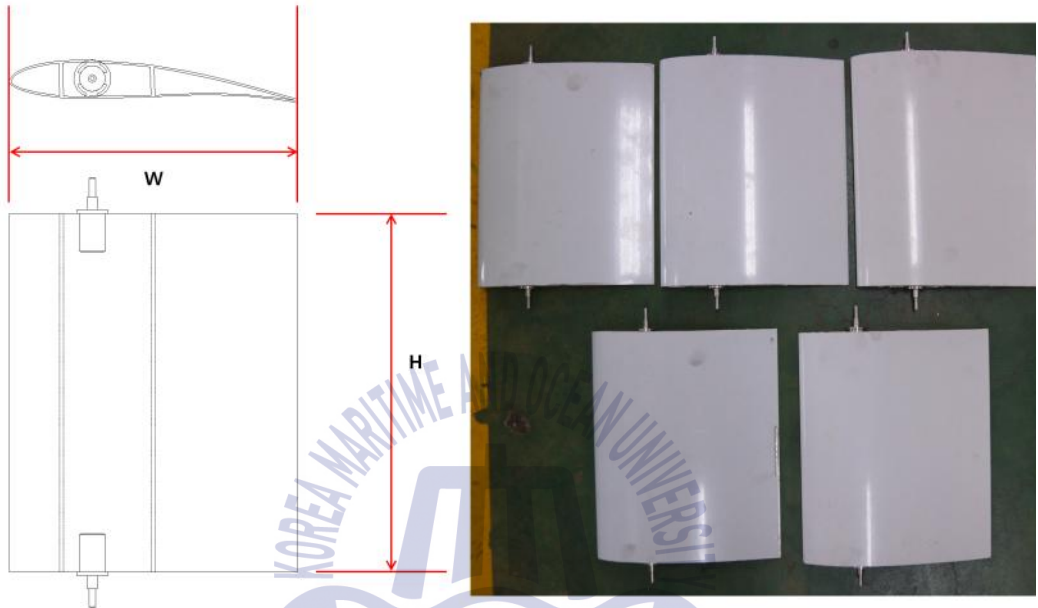


Fig. 3.2 2D modeling and prototype of blades

Table 3.1 Specification of blades

Material	Aluminium (coated)
Width of blade	0.225 <i>mm</i>
Height of blade	0.280 <i>mm</i>
Weight	0.7 <i>kg</i>
Number of blade	5 <i>EA</i>



### 3.1.2 스톱퍼 장치

스톱퍼(Stopper) 장치는 블레이드의 피치 각도가 일정 범위 내에서 변화도록 하는 장치이다. 블레이드 상판에 지름 3 mm의 스톱퍼 홀(Stopper hole)을 뚫고 각각의 실험조건에 맞는 스톱퍼 홀에 고정나사를 삽입하여 블레이드의 회전각도 범위를 제한한다. Fig. 3.3과 Fig. 3.4는 스톱퍼 장치의 스톱퍼 홀을 나타내는 스톱퍼 장치의 실제사진과 2D 모델링이다.



Fig. 3.3 Prototype of the stopper units



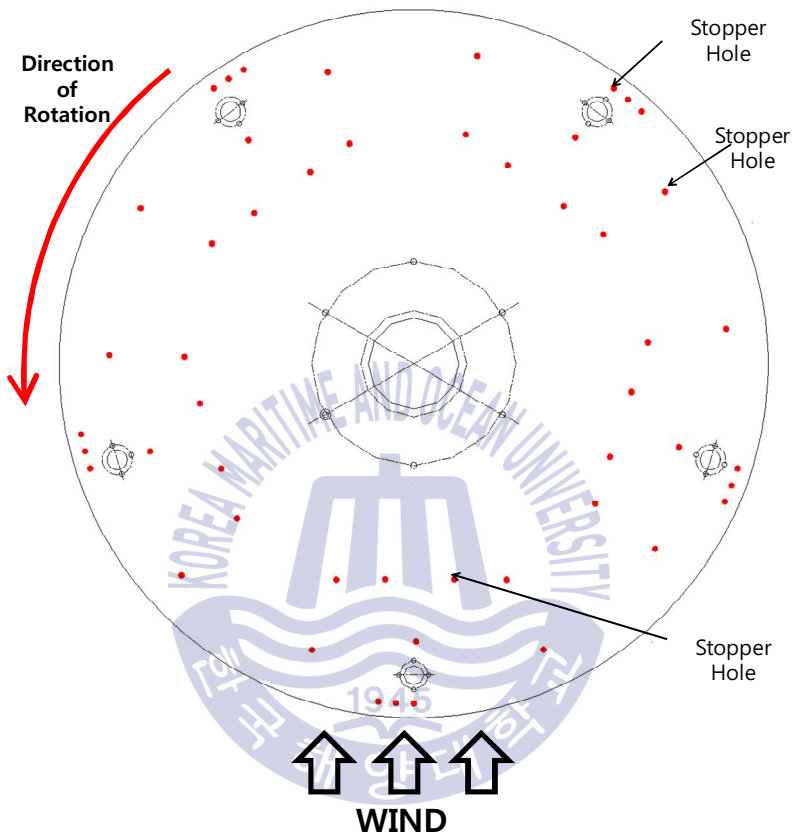


Fig. 3.4 2D modeling of the stopper units

### 3.1.3 블레이드 상·하판 및 중심축

블레이드 상·하판의 지름은 500 mm이고, 블레이드 결합 위치는 중심으로 부터 220 mm 떨어져있다. 5엽의 날개를 결합하기 위해 5개의 홀을 가공하였다. 본 연구에서 사용되는 스파 타입의 부유체는 다른 타입의 부유식 구조물보다 홀수가 매우 깊고 무게중심이 낮아 다른 부유식 구조물보다 상하동요에 대한 응답성능이 좋다는 장점이 있다. 이러한 스파 타입 구조물의 장점을 최대화하기 위해서는 부유체 상단부에 고정되는 수직축 풍력발전기의 경량화가 필요하다. 이를 위해서 블레이드 상·하판의 재질은 충격강도가 크고 가벼운 폴리카보네이트(Polycarbonate)재질을 사용하였다. Fig. 3.5은 블레이드 상·하판의 2D 모델링 및 실제 제작 사진이다.

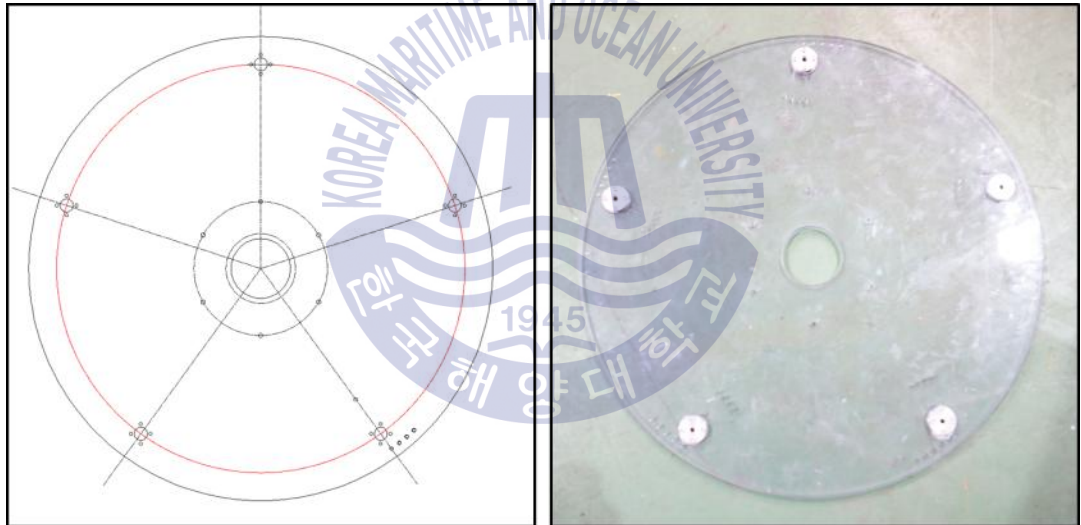


Fig. 3.5 2D modeling and prototype of the top and bottom plates

Table 3.2 Specification of the top and bottom plates

Material	Polycarbonate
Diameter	500 mm
Weight	2.4 kg

중심축은 블레이드 상·하판 및 지지대의 중심에 위치하여 결합된다. 중심축의 재질은 스테인리스 강(Stainless steel)을 이용하여 제작되었다. Fig. 3.6과 Fig. 3.7은 2D 모델링 및 실제 제작 사진을 나타내며, Table 3.3은 중심축의 제원을 나타낸다.

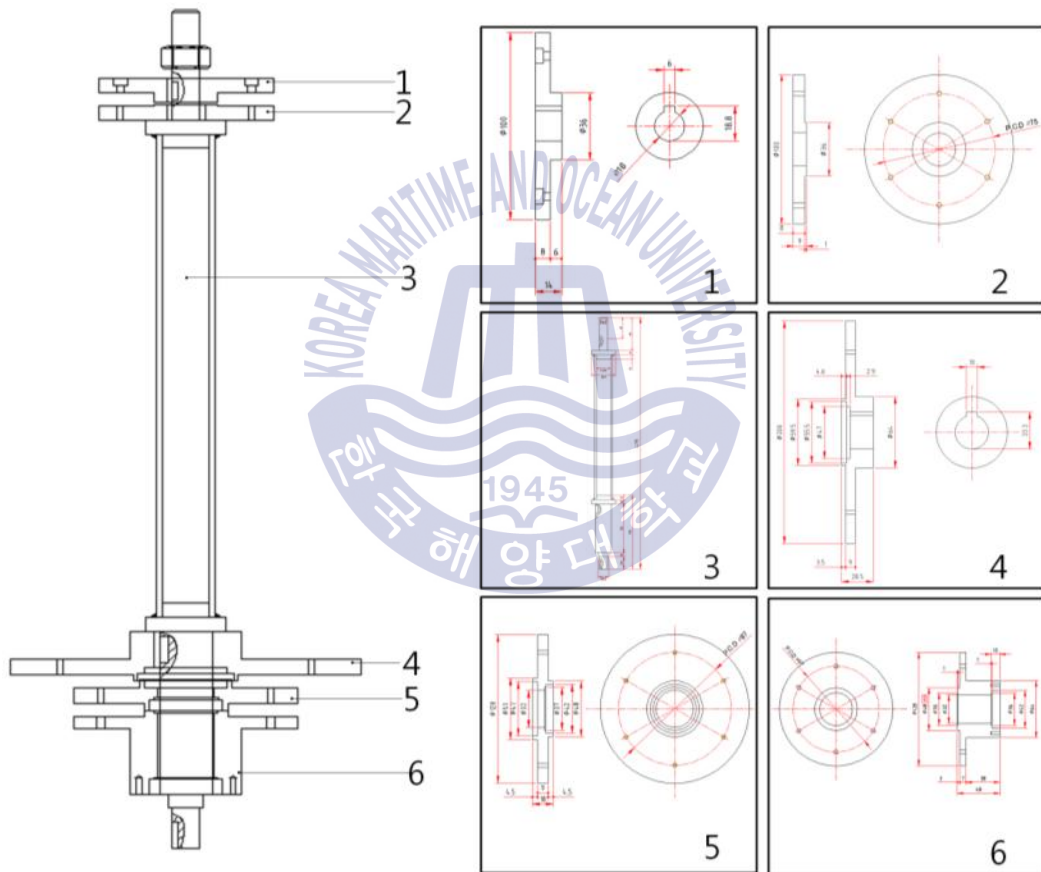


Fig. 3.6 2D modeling of the main column

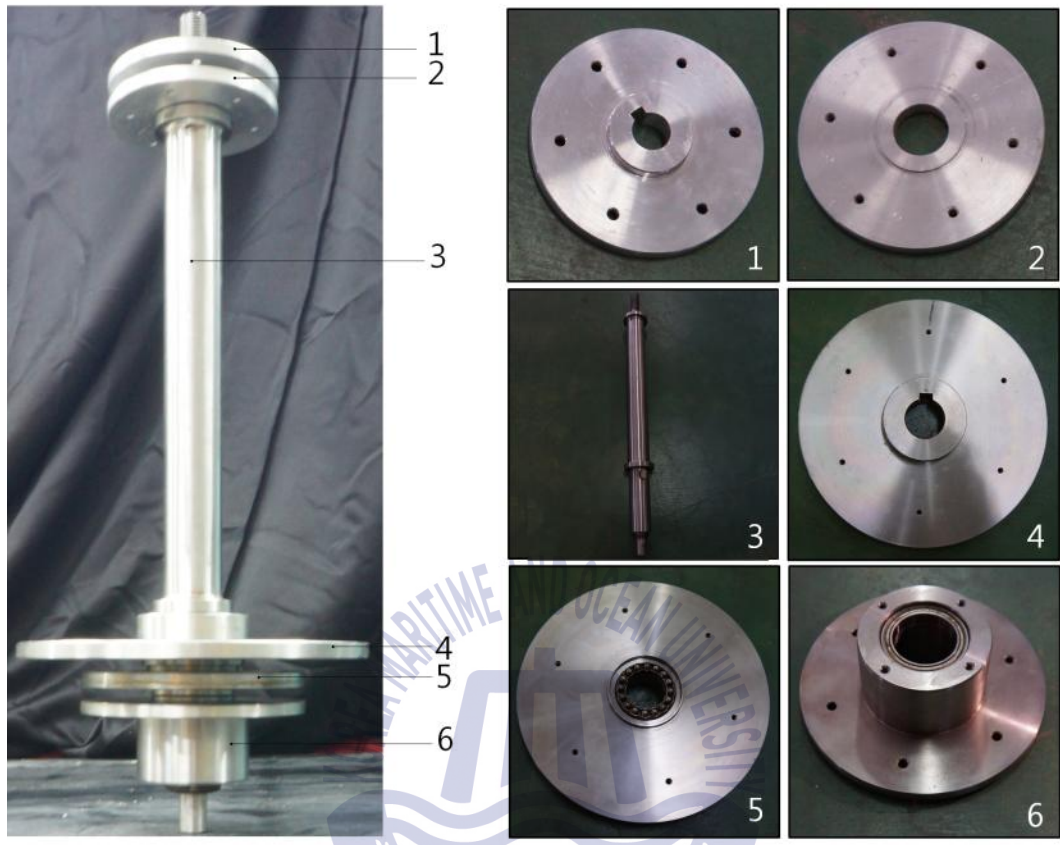


Fig. 3.7 Prototype of the main column

Table 3.3 Specification of the main column

Main column parts number	Weight	Material
1	0.18 <i>kg</i>	Stainless steel
2	0.16 <i>kg</i>	
3	1.64 <i>kg</i>	
4	2.48 <i>kg</i>	
5	0.92 <i>kg</i>	
6	1.38 <i>kg</i>	

### 3.1.4 지지대

지지대는 풍력발전기를 지지하는 장치로써 지지대 상·하판, 지지축, 스텝핑 모터 마운트로 설계되었다. 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 지지축의 길이는 390 mm로 제작되었다. Fig. 3.8은 지지대의 2D모델링 및 실제 사진이다. Table 3.4는 지지대의 제원을 나타낸다.

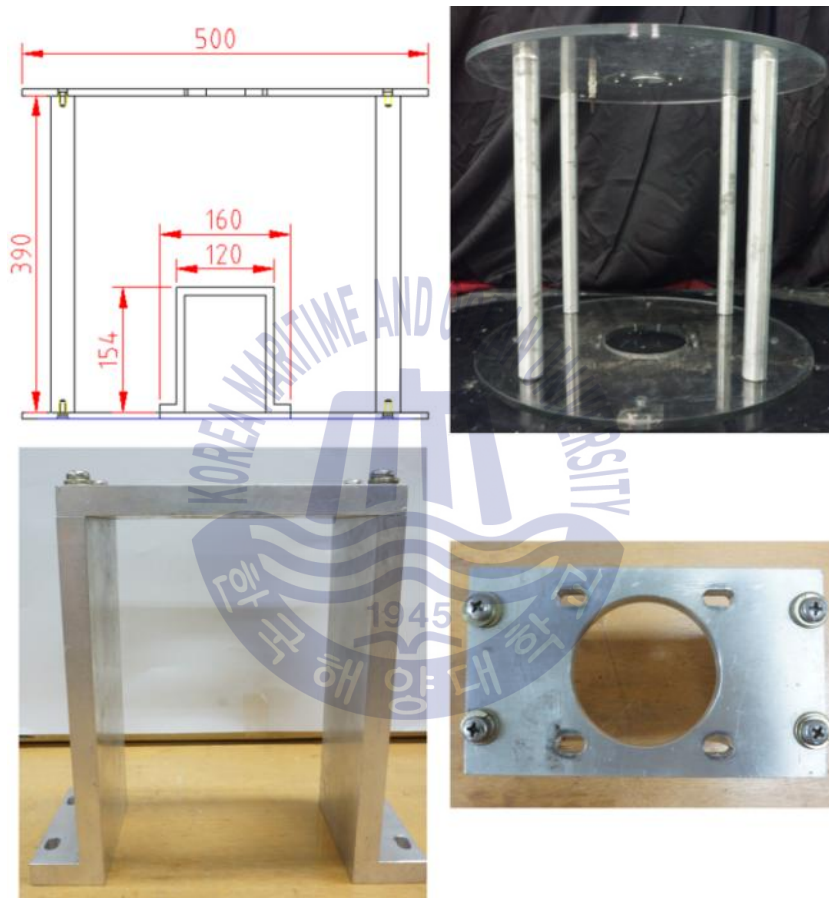


Fig. 3.8 2D modeling and prototype of the support fixture

Table 3.4 Specification of the support fixture

Name	Weight	No.	Material
Top and bottom plates	2.40 kg	2 EA	Polycarbonate
Column	0.36 kg	4 EA	Stainless steel
Stepping motor mount	0.81 kg	1 EA	Stainless steel

### 3.2 해양 공학수조를 이용한 풍력발전 실험용 풍력발전기 형상 설계

해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험용 풍력발전기의 형상 설계는 2차원 수조를 이용한 풍동실험용 풍력발전기와 동일한 설계프로그램을 이용하여 설계하였다. 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 풍력발전기 보다 짧은 지지대를 사용함으로써 부유식 수직축 풍력발전기의 경량화와 안정성 및 실험의 용이성을 높였다. 주요 구성품은 블레이드, 블레이드 상·하판, 중심축, 지지대, 부유체(Floating body)이다. 지지대와 부유체를 제외한 가변 피치형 부유식 수직축 풍력발전기의 형상은 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 풍력발전기와 동일하다. Fig. 3.9는 부유식 풍력발전기의 2D 모델링 및 실제 제작 사진이다.

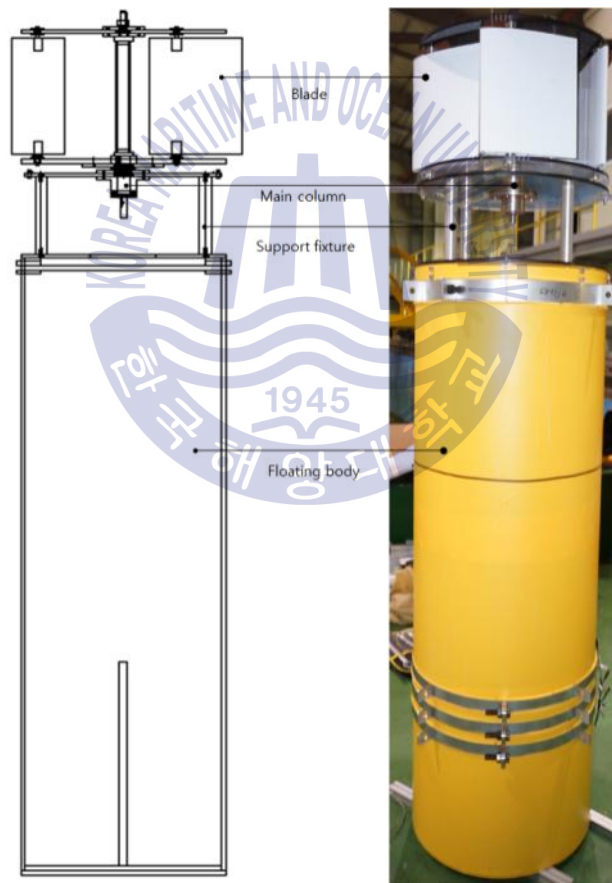


Fig. 3.9 2D modeling and prototype of the floating wind turbine



### 3.2.1 부유체

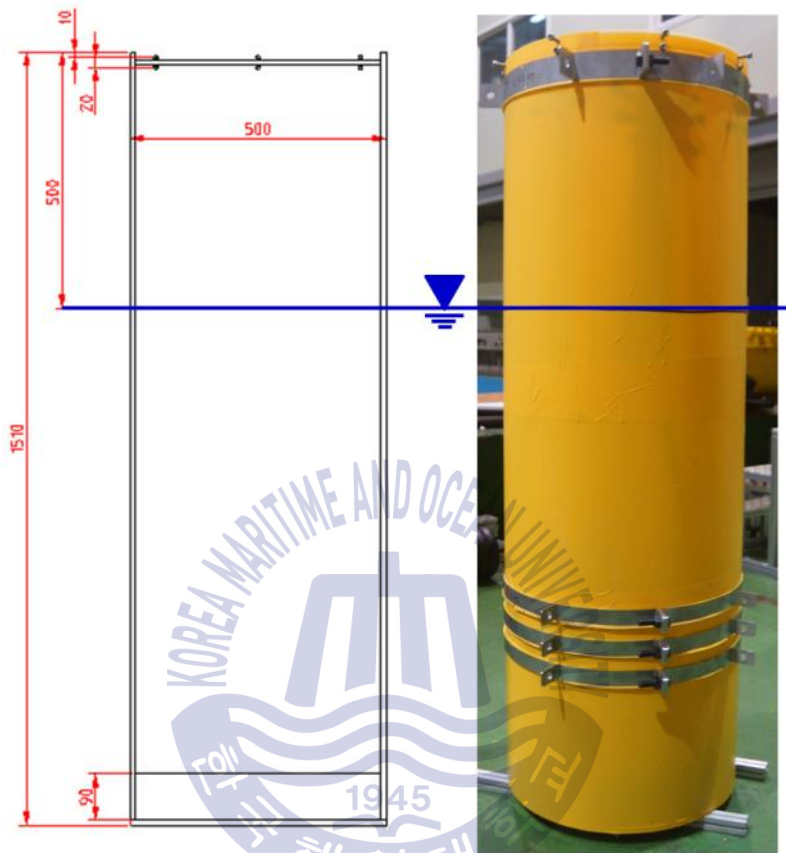


Fig. 3.10 2D modeling and prototype of the floating body

Table 3.5 Specification of the floating body

Hull material	Acrylic
Hull type	Spar
Hull diameter	500 mm
Hull height	1500 mm
Hull draft	1000 mm
Hull weight	32.7 kg
Weight material	Steel
Total weight	161 kg

### 3.2.2 지지대

부유식 풍력발전기의 지지대는 실험 측정의 용이성을 고려하여 지지축의 길이를 190 mm로 제작되었다. 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 풍력발전기의 지지축 보다 짧은 길이의 지지축을 제작한 이유는 부유식 풍력발전 실험시 지지대의 길이가 부유식 풍력발전기의 무게중심을 낮추는 중요한 변수이기 때문이다. 또한 스테핑 모터를 사용하지 않고 무부하 상태에서 비접촉식 RPM측정기를 이용하여 RPM만을 계측한다. 즉 부유식 풍력발전 실험에 불필요한 스테핑 모터 마운트를 제거하여 지지대의 길이를 최소화 하였다. Fig. 3.11은 해양공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험용 지지대의 2D 모델링 및 실제 사진이다. Table 3.6은 부유식 풍력발전기 지지대의 제원을 나타낸다.



Fig. 3.11 2D modeling and prototype of the support fixture

Table 3.6 Specification of the support fixture

Name	Weight	Units	Material
Top and bottom plates	2.40 kg	2 EA	Polycarbonate
Column	0.36 kg	4 EA	Stainless steel



## 제 4 장 모형실험

### 4.1 실험 측정기기 및 풍동실험 환경 조성

본 연구에서는 가변 피치형 부유식 수직축 풍력발전기의 발전 효율 및 해양 환경 하중에 의한 동적거동을 체계적으로 파악하고 부유체의 동적거동과 발전 효율 간의 상호작용을 분석하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 모형실험은 한국해양대학교의 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험과 중소조선연구원의 해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험을 실시하였다. Fig. 4.1 ~ Fig. 4.5는 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험용 RPM 측정기, 토크측정기, 풍속 측정기, 스테핑 모터, 커플링 사진이며 Fig. 4.6과 Fig. 4.7은 해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험에서 사용된 풍속 측정기 및 RPM 측정기이다. Table 4.1 ~ Table 4.7은 각각의 측정기기 제원을 나타낸다.



Fig. 4.1 RPM sensor

Table 4.1 Specifications of the RPM sensor

Detection method	Hall element
Frequency	1 Hz to 20 Hz
Revolution	1 to 20,000 r/min
Module	0.5 to 3
Tooth width	3 mm or greater
Impedance	Approx. 330 $\Omega$

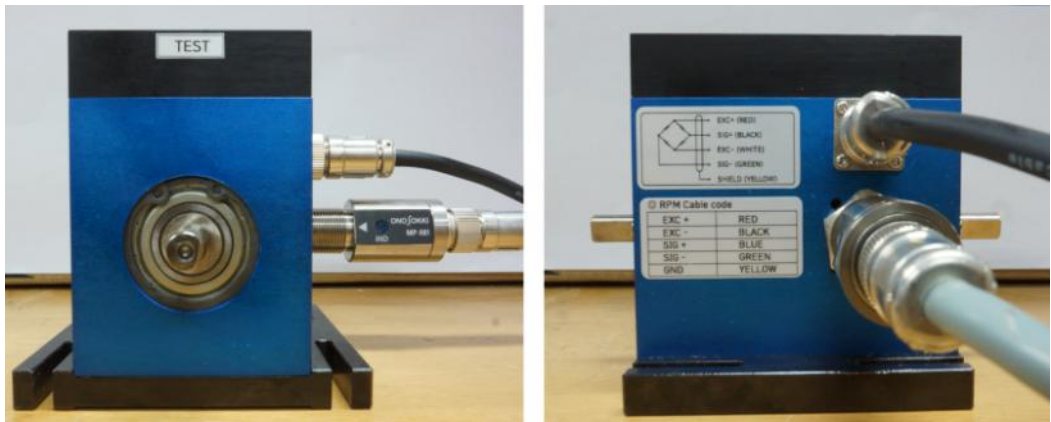


Fig. 4.2 Torque meter

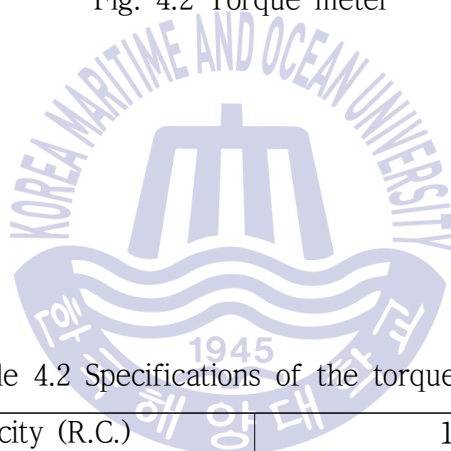


Table 4.2 Specifications of the torque meter

Rated capacity (R.C.)	10 <i>kgf.cm</i>
Rated output (R.O.)	1.3 ± 0.3 <i>mV/V</i>
Non linearity	≤ 0.25 % R.O.
Hysteresis (30min)	≤ 0.25 % R.O.
Repeatability	≤ 0.25 % R.O.
Insulation resistance bridge	> 200 <i>MΩ</i>
Temperature effect, on rated output	≤ 0.2 % LOAD / 10 °C
Temperature effect, on zero balance	≤ 0.2 % R.O. / 10 °C
Safe overload	150 % R.C.



Fig. 4.3 Wind meter

Table 4.3 Specifications of the wind meter

Sensor	3 cup anemometer
Sensing	Reed switch/magnet provide 1 pulse per rotation
Range	1.39 $m/s$ to over 55.6 $m/s$
Accuracy	Better than 0.5 $m/s$
Rotor diameter	125 $mm$



Fig. 4.4 Stepping motor

Table 4.4 Specifications of the stepping motor

Model	A50K-M566-G10
Holding torque	5.0 $N \cdot m$
Rotor inertia moment	$280 \times 10^{-7} kg \cdot m^2$
Rated current / phase	1.4 $A / Phase$
Reduction gear ratio	1:10
Weight	about 1.3 $kg$

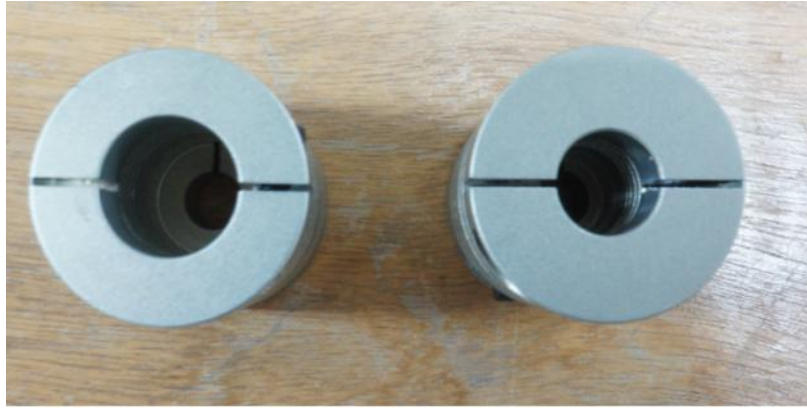


Fig. 4.5 Coupling

Table 4.5 Specifications of the coupling

Model	DRB-39 SUS
Max torque	16 $N \cdot m$
Max RPM	15,000 $\text{min}^{-1}$
Moment of inertia	$8.7 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}$
Torsional stiffness	1,000 $N \cdot \text{m}/\text{rad}$
Standard inner diameter	8, 12 $\text{mm}$ / 8, 16 $\text{mm}$



Fig. 4.6 Wind meter

Table 4.6 Specifications of the wind meter

Model	AVM-07
Air velocity range	0 to 45 $m/s$
Air velocity resolution	0.01 $m/s$
Temperature range	0 to 45 $^{\circ}C$
Temperature resolution	0.1 $^{\circ}C$
Dimensions of meter	88×168×26.2 $mm$
Dimensions of vane	66×132×29.2 $mm$





#### 4.1.1 풍속 측정 및 풍동실험

가변 피치형 수직축 풍력발전기의 풍동실험 환경 조성을 위해 한국해양대학교 해양시스템 연구실의 2차원 조파수조를 활용하여 Fig. 4.8과 같이 풍동시스템을 구축하였다. 2차원 조파수조의 제원은 길이 25 m, 폭 1 m, 깊이 1.2 m이다. 인버터로 모터의 회전수를 조절하여 풍속을 제어하였다. 또한 바람발생장치에서 생성된 바람이 조파수조를 따라 균일하게 흐를 수 있도록 조파수조 상단부에 수조 덮개를 설치하여 간이형 풍동환경을 구축하였다. 실험에 사용된 풍속은 바람발생장치와 풍속계간 1.5 m 위치에서 3회에 걸쳐 5분간 측정된 풍속의 평균값이다. 풍속 범위는  $3\text{ m/s} \sim 10\text{ m/s}$ 이다.

바람발생장치와 가변 피치형 수직축 풍력발전기 간 거리는 풍속측정 위치와 동일한 1.5 m이다. Fig. 4.9은 풍속 측정 및 풍동실험사진이다.



Fig 4.8 Wind tunnel - the wind tunnel system using a 2-dimensional basin



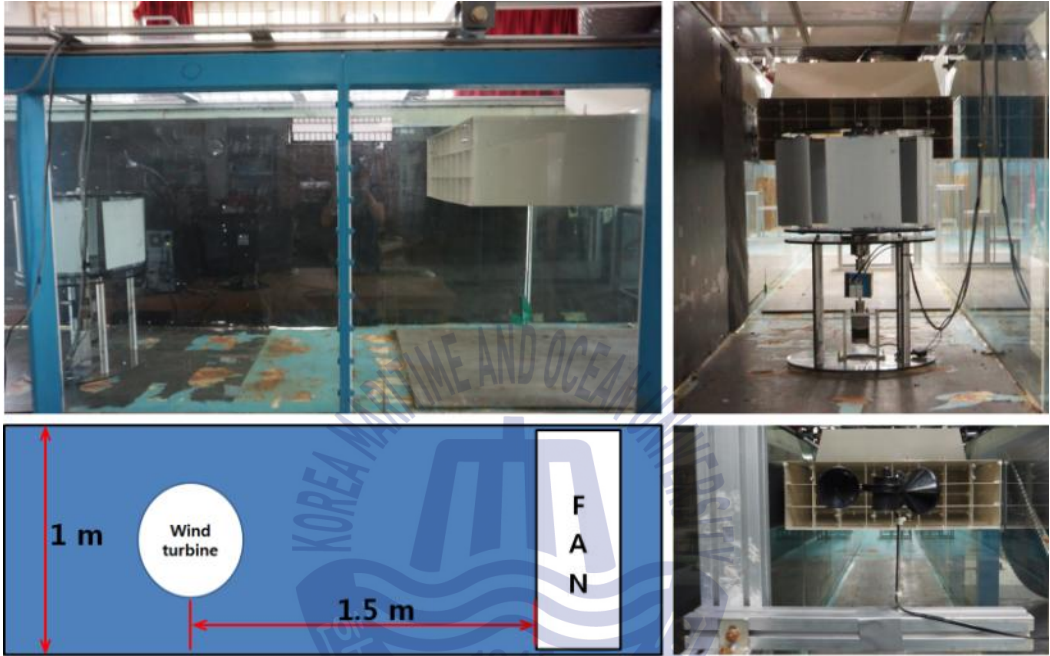


Fig. 4.9 Anemometry and experiment of the wind turbine

#### 4.1.2 기계적 출력 실험 장비

풍력발전기의 출력 성능을 평가하는 방법에는 발전기의 전력을 측정하는 방법과 회전축의 토크를 측정하는 방법이 있다. 발전기의 전력을 측정하면 기계 손실과 전기손실을 모두 고려한 전력을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 발전기를 적절히 설계하는 것이 출력 성능을 평가하는 가장 큰 변수가 된다. 반면에 회전축의 토크를 측정하는 방법은 블레이드에서 회전축의 토크로 전환되는 효율만을 평가할 수 있다. 즉 회전축의 토크를 전기 에너지로 변환하며 생기는 변수를 무시할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 풍력발전기의 출력 성능을 평가하기 위해 기계적인 효율만을 평가하는 회전축의 토크를 측정하는 방법을 사용하였다.

풍력발전기의 기계적 출력을 측정하는 실험 장비는 RPM과 토크를 동시에 측정할 수 있는 토크센와 측정값을 실시간으로 확인할 수 있는 모니터로 이루어져 있으며, 부하 장치로는 스텝핑 모터가 장착되어 Fig. 4.10과 같이 구성된다.

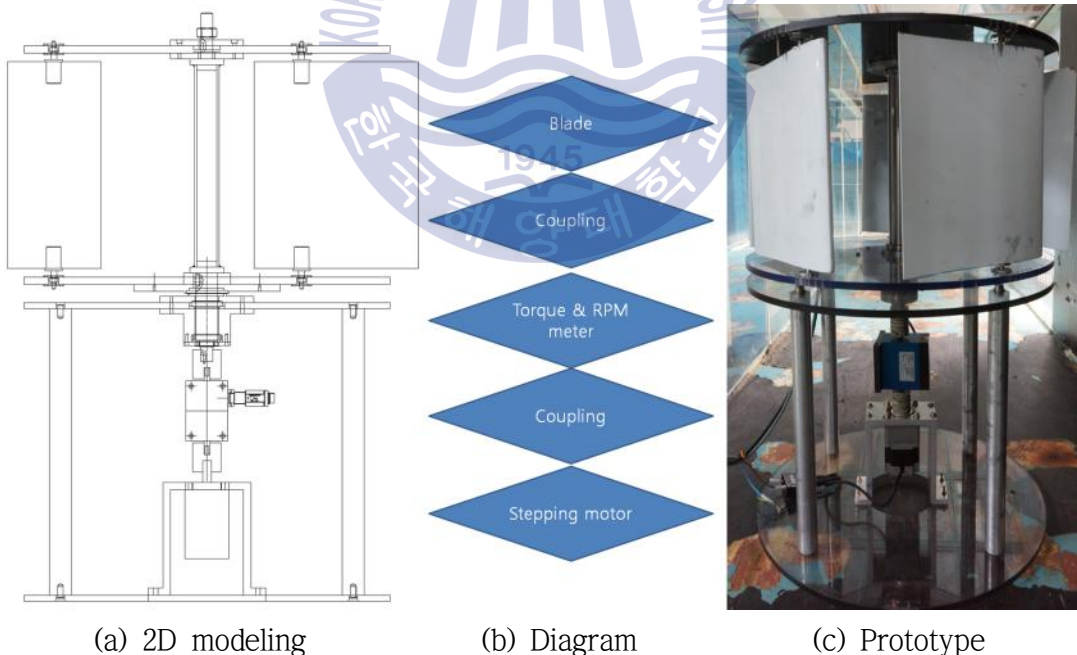


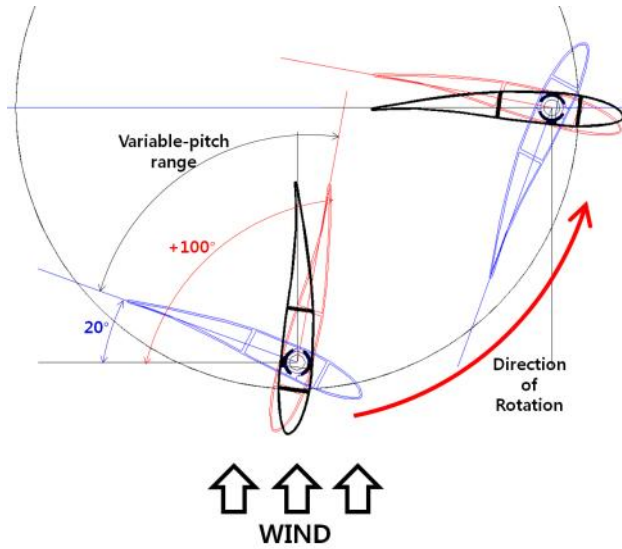
Fig. 4.10 Mechanical measuring systems

## 4.2 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험

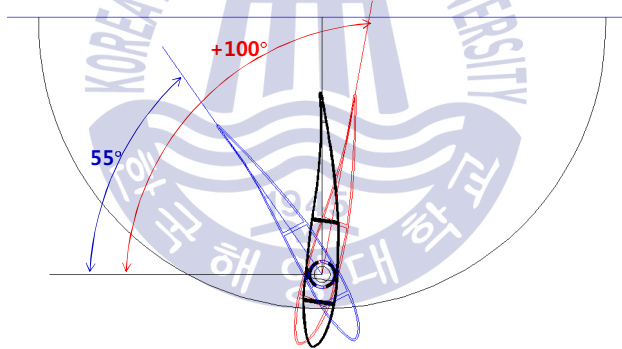
2차원 조파수조를 이용한 풍동실험의 블레이드의 피치 가변 범위는 블레이드 원형 상판의 접선을  $0^\circ$  로 기준으로 하여 설정하였다. 조건별 피치 변화 각도는  $+20^\circ$  에서  $+100^\circ$  ,  $+55^\circ$  에서  $+100^\circ$  ,  $+80^\circ$  에서  $+100^\circ$  ,  $+80^\circ$  에서  $+125^\circ$  ,  $+80^\circ$  에서  $+160^\circ$  ,  $-35^\circ$  에서  $+25^\circ$  ,  $-15^\circ$  에서  $+65^\circ$  ,  $-10^\circ$  에서  $+105^\circ$  ,  $-50^\circ$  에서  $+50^\circ$  로 총 9가지이다. 각각의 조건에서 날개 각도가 자유롭게 움직일 수 있도록 하였다. Fig. 4.11은 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험에서의 조건별 피치 가변 범위를 나타내고 있다. 피치 가변 범위 조건 1인 Fig. 4.11 (a) 그림에 바람의 방향과 블레이드의 회전방향을 표시하였고 블레이드의 로터가  $90^\circ$  회전하였을 때 블레이드의 피치 가변 범위를 도식화하였다. Fig. 4.11 (b) ~ Fig. 4.11 (i)의 경우 블레이드의 피치 가변 범위를 제외한 모든 조건은 Fig. 4.11 (a)와 동일하기 때문에 바람의 방향과 블레이드의 회전방향 그리고 로터가  $90^\circ$  회전하였을 때 블레이드의 피치 가변 범위는 생략하였다.

2차원 조파수조를 이용한 풍동실험의 블레이드 고정 각도는  $+20^\circ$  ,  $+55^\circ$  ,  $+80^\circ$  ,  $90^\circ$  ,  $+100^\circ$  ,  $+125^\circ$  ,  $+160^\circ$  ,  $-50^\circ$  ,  $-35^\circ$  ,  $-15^\circ$  ,  $-10^\circ$  ,  $+25^\circ$  ,  $+50^\circ$  ,  $+65^\circ$  ,  $+105^\circ$  로 총 15가지이다. Fig. 4.12와 Fig. 4.13는 1차 풍동실험에서의 고정된 블레이드 각도를 나타내고 있다.

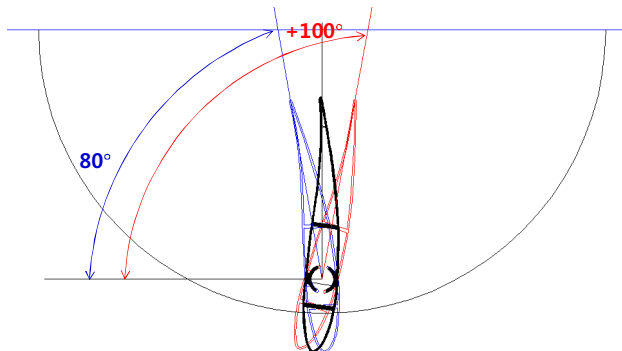
기동풍속 측정을 위해서 무부하 상태와 부하 상태에서의 풍속별 RPM을 측정하였다. 기동풍속이란 수직축 풍력터빈의 최초 기동이 시작되는 풍속을 말한다. 최초로 기동이 시작되는 풍력발전기는 무부하 상태로 전기적 저항이 없는 상태이다. 실제 해상풍력 발전기의 경우 초기 기동풍속을 낮추기 위해서 코깅토크 저감을 위한 다양한 장치를 이용한다. 그러나 본 연구에서는 수직축 풍력발전기의 모델사이즈 축소 제작으로 인하여 코깅토크 저감 장치를 장착하지 못하였다. 따라서 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험에서는 수동으로 모터에 부하 여부를 결정하여 기동풍속을 확인하였다.



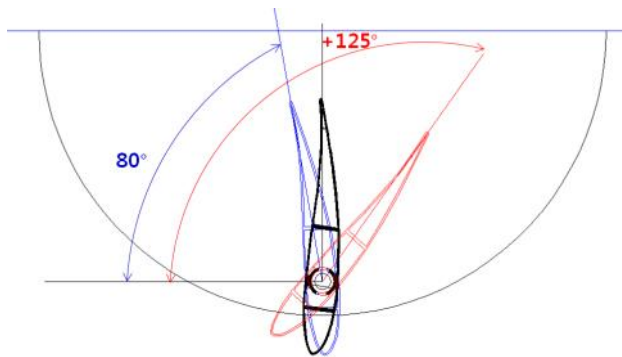
(a) Variable-pitch range case 1



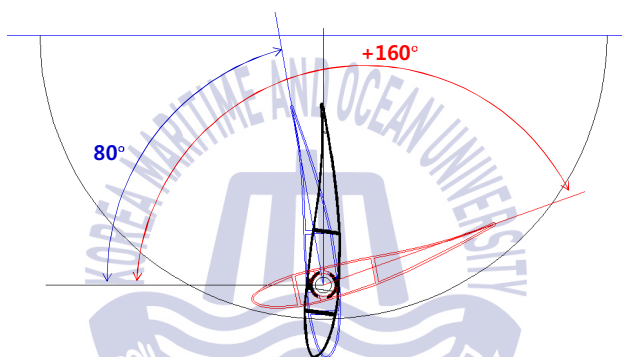
(b) Variable-pitch range case 2



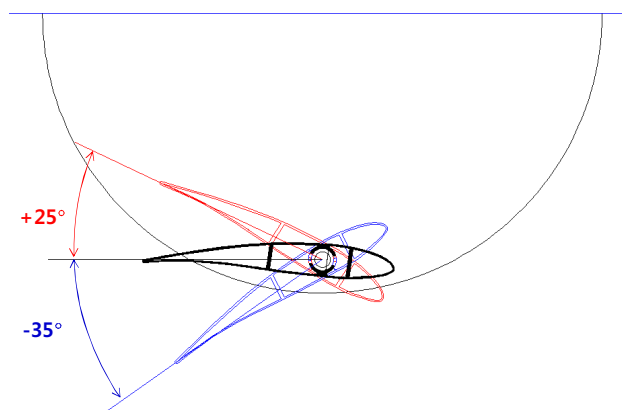
(c) Variable-pitch range case 3



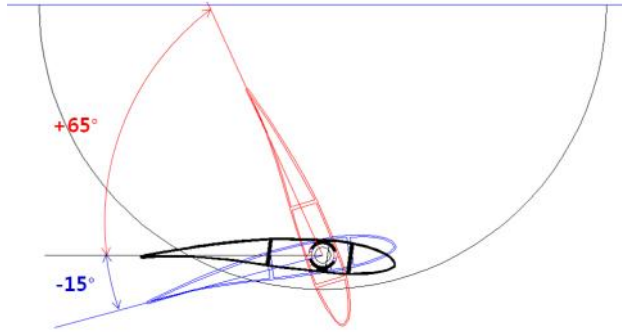
(d) Variable-pitch range case 4



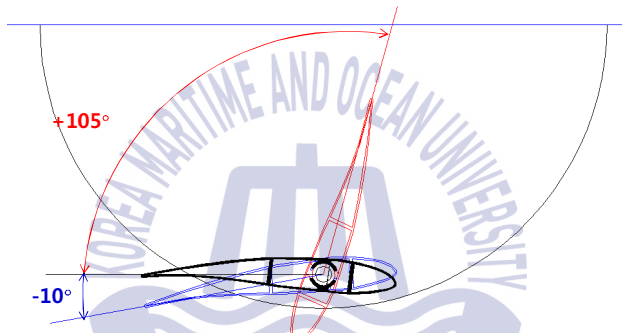
(e) Variable-pitch range case 5



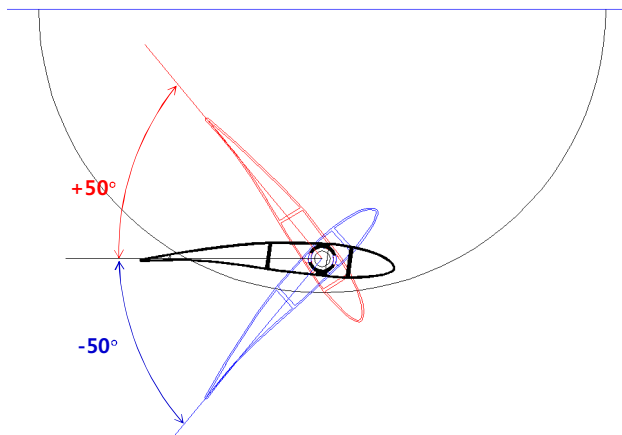
(f) Variable-pitch range case 6



(g) Variable-pitch range case 7



(h) Variable-pitch range case 8



(i) Variable-pitch range case 9

Fig. 4.11 Variable-pitch range of the blade

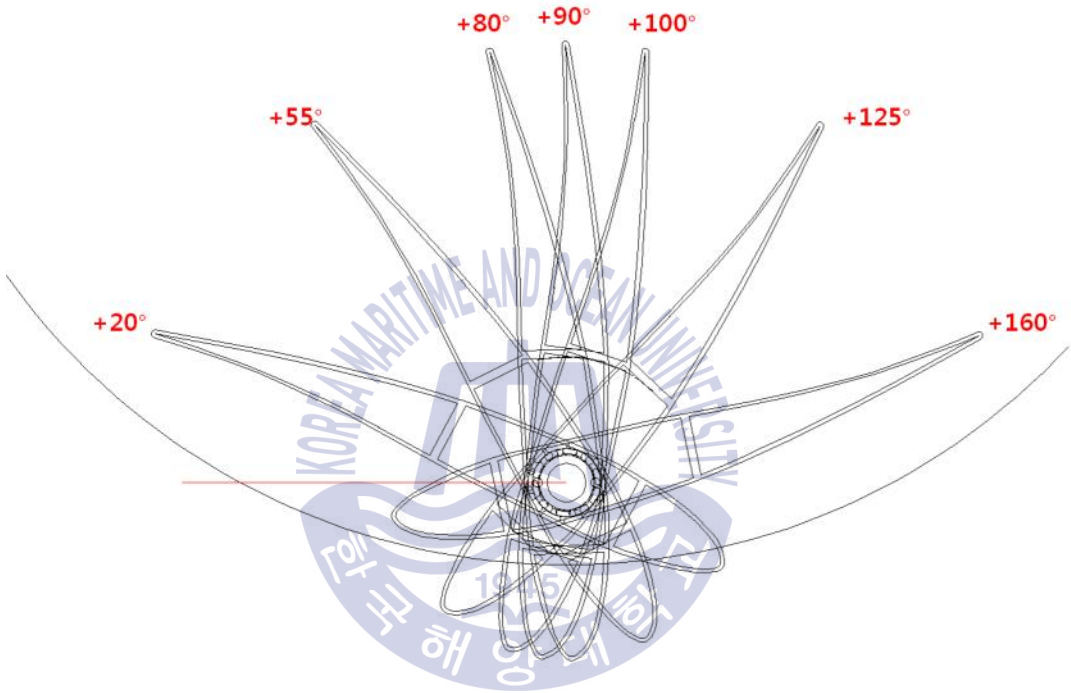


Fig. 4.12 Fixed pitch angle of the blade - case 1 ~ case 7



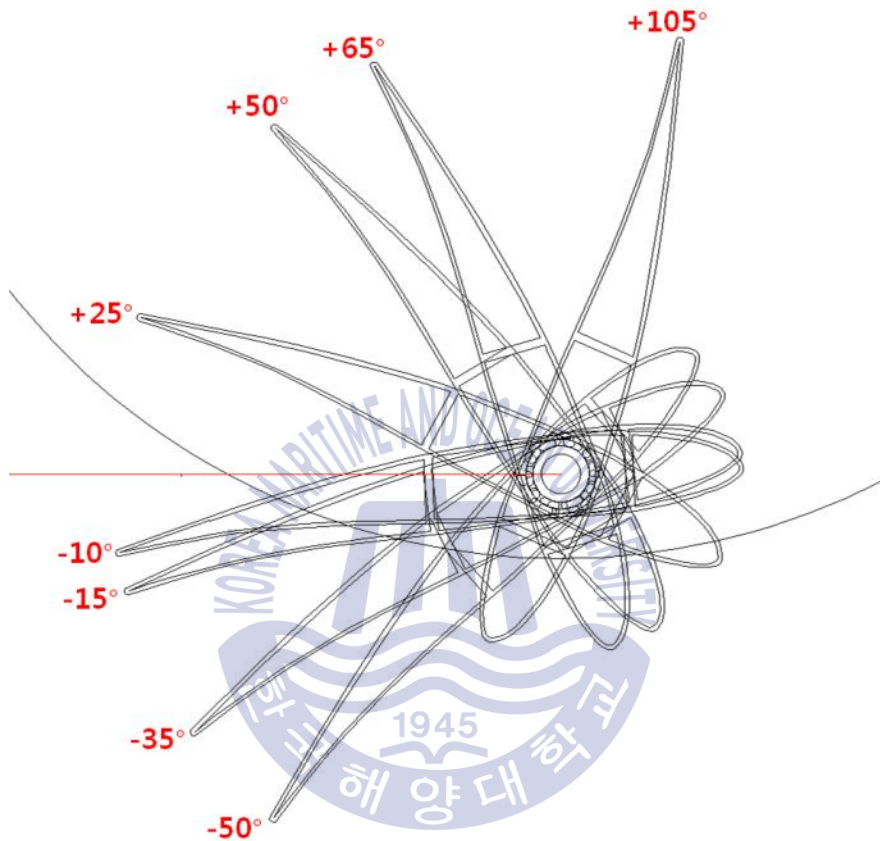


Fig. 4.13 Fixed angle of the blade – case 8 ~ case 15

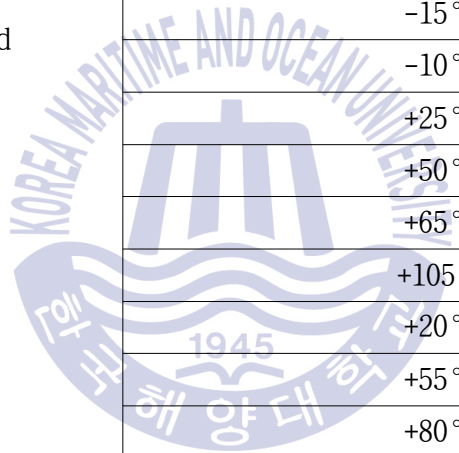


Table 4.8은 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험 조건인 부하 여부, 피치 가변 범위, 피치 고정 각도를 나타낸 것이다.

Table 4.8 Design parameters for experimental condition

No.	Load & No-load	Variable-pitch range & Fixed pitch angle
1	No-load	+20° ~ +100°
2		+55° ~ +100°
3		+80° ~ +100°
4		+80° ~ +125°
5		+80° ~ +160°
6		-35° ~ +25°
7		-15° ~ +65°
8		-10° ~ +105°
9		-50° ~ +50°
10		-50°
11		-35°
12		-15°
13		-10°
14		+25°
15		+50°
16		+65°
17		+105°
18		+20°
19		+55°
20		+80°
21		+90°
22		+100°
23		+125°
24		+160°

25	Load	+20° ~ +100°
26		+55° ~ +100°
27		+80° ~ +100°
28		+80° ~ +125°
29		+80° ~ +160°
30		-35° ~ +25°
31		-15° ~ +65°
32		-10° ~ +105°
33		-50° ~ +50°
34		-50°
35		-35°
36		-15°
37		-10°
38		+25°
39		+50°
40		+65°
41		+105°
42		+20°
43		+55°
44		+80°
45		+90°
46		+100°
47		+125°
48		+160°



### 4.3 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험 결과에 대한 고찰

Fig. 4.14는 무부하 상태에서의 피치 가변 범위 조건 1~5의 풍속별 RPM 측정 결과를 나타낸 그래프이고 Fig. 4.15는 무부하 상태에서의 피치 고정 각도 조건 1~7에 따른 풍속별 RPM 측정값을 나타낸 그래프이다.

Fig. 4.16에서 Fig. 4.18은 부하 상태에서의 피치 가변 범위 조건 1~5의 풍속별 RPM, 토크 및 출력 측정값을 나타낸 그래프이고 Fig. 4.19에서 Fig. 4.21은 부하 상태에서의 피치 고정 각도 조건 1~7에 따른 풍속별 RPM, 토크 및 출력 측정값을 나타낸 그래프이다. 측정 결과 피치 가변 범위  $+80^{\circ} \sim +125^{\circ}$  에서 최대 효율을 확인하였다. 특히 피치 가변 범위  $+80^{\circ} \sim +125^{\circ}$  를 기준으로  $+40^{\circ}$  만큼 피치 가변 범위가 넓은  $+80^{\circ} \sim +160^{\circ}$  경우에는 블레이드가 회전하지 않음을 확인하였다. 또한 최대 효율을 보이는 피치 가변 범위  $+80^{\circ} \sim +125^{\circ}$  를 기준으로 피치 가변 범위가 음의 방향으로 이동할수록 효율이 떨어짐을 확인하였다. 이러한 현상은 피치 각도가 고정된 조건에서도  $125^{\circ}$  에서 최대 효율을 가지고 피치 고정 각도가  $125^{\circ}$  에서 멀어질수록 효율이 떨어짐을 확인하였다.

무부하 상태에서 피치 가변 범위 조건 1~5, 피치 고정 각도 조건 1~7의 RPM 측정 결과 부하상태에서 회전하지 않은 피치 가변 범위  $+80^{\circ} \sim +160^{\circ}$  를 제외한 모든 조건에서 풍동시스템의 최저 풍속범위인  $3\text{ m/s}$  와  $4\text{ m/s}$  에서 기동이 일어난다는 것을 확인 하였다. 또한 블레이드를 고정한 경우에는 부하상태에서 회전하지 않은  $+20^{\circ}$  와  $+160^{\circ}$  를 제외한 모든 경우에서  $3\text{ m/s}$  와  $4\text{ m/s}$  에서 기동이 일어난다는 것을 확인 하였다.

Fig. 4.22는 무부하 상태에서의 피치 가변 범위 조건 6 ~ 9에 따른 풍속별 RPM 측정 결과를 나타낸 그래프이고 Fig. 4.23은 무부하 상태에서 피치 고정 각도 조건 8 ~ 15에 따른 풍속별 RPM 측정값을 나타낸 그래프이다. 측정 결과 모든 피치 가변 범위에서 풍동시스템의 최저 풍속인  $3\text{ m/s}$  에서 기동이 일어난다는 것을 확인 하였다. 블레이드를 고정한 조건에서는  $+25^{\circ}$  ,  $+50^{\circ}$  를 제외한 모든 조건에서 풍동시스템의 최저 풍속인  $3\text{ m/s}$  에서의 최초기동을 확인하였다.

Fig. 4.24에서 Fig. 4.26은 부하 상태에서의 피치 가변 범위 조건 6 ~ 9의 풍속별 RPM, 토크 및 출력값을 나타낸 그래프이고 Fig. 4.27에서 Fig. 4.29는 부하 상태에서의 각각의 피치 고정 각도에 따른 풍속별 RPM, 토크 및 출력값을 나타낸 그래프이다.

측정 결과 피치가변 범위 조건 1 ~ 5, 피치 고정각도 조건 1 ~ 7의 풍동실험 결과와는 달리 블레이드가 가변하는 경우가 고정되어 있는 경우보다 출력이 현저하게 떨어지는 것을 확인하였다. 출력이 떨어지는 원인을 파악하기 위해서 피치 가변이 가장 활발하게 일어나는 조건인  $-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$  일 때 위치별 블레이드 자세를 Fig. 4.30과 같이 도식화 하였다. 도식화한 그림을 살펴보면 크게 양력구간, 항력구간, 블레이드 회전구간으로 나눌 수 있다. 블레이드 회전구간에서 블레이드의 피치각이 크게 변하며 스토퍼의 고정나사와 블레이드가 부딪히게 되는데 이때의 충격력으로 인해 발전효율이 떨어진다.



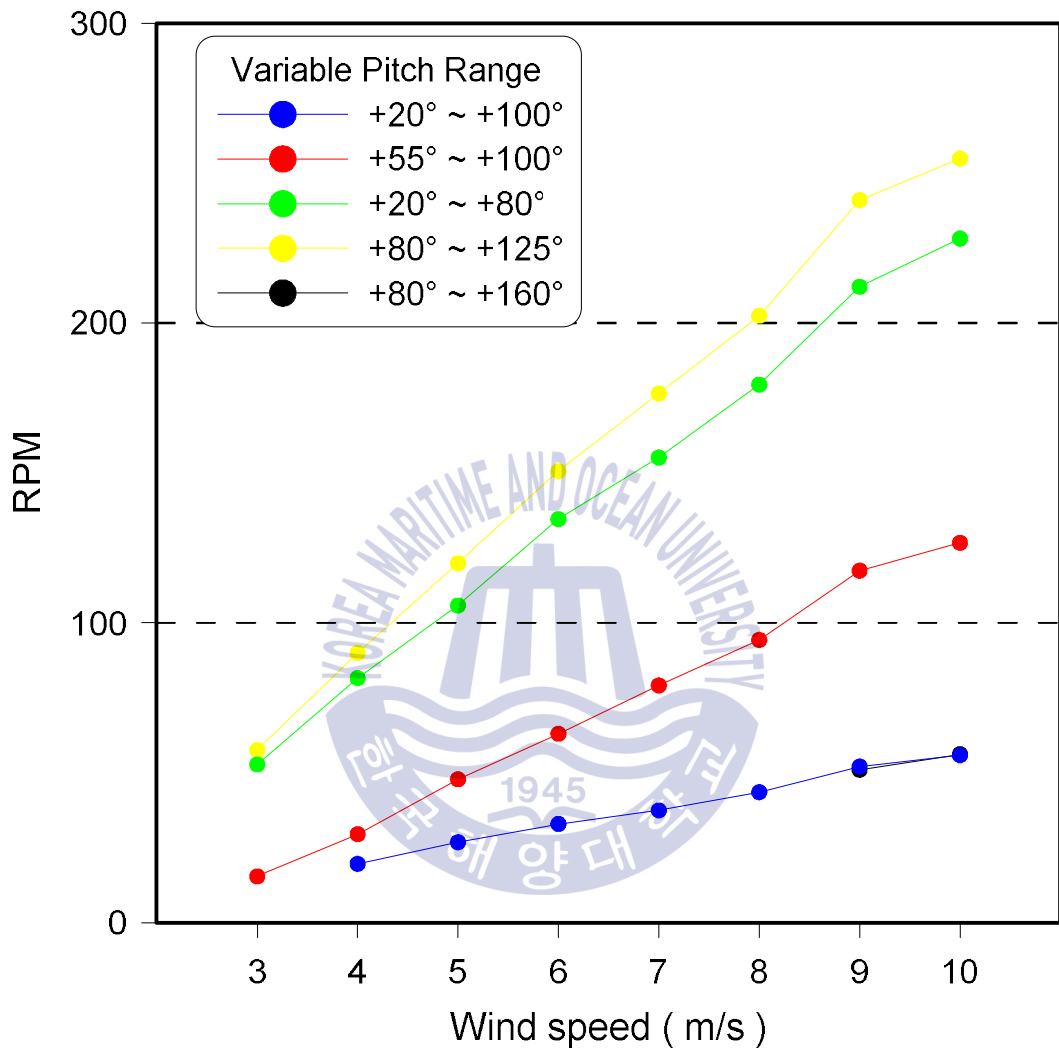


Fig. 4.14 The RPM by the wind speed following variable-pitch range in no load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5

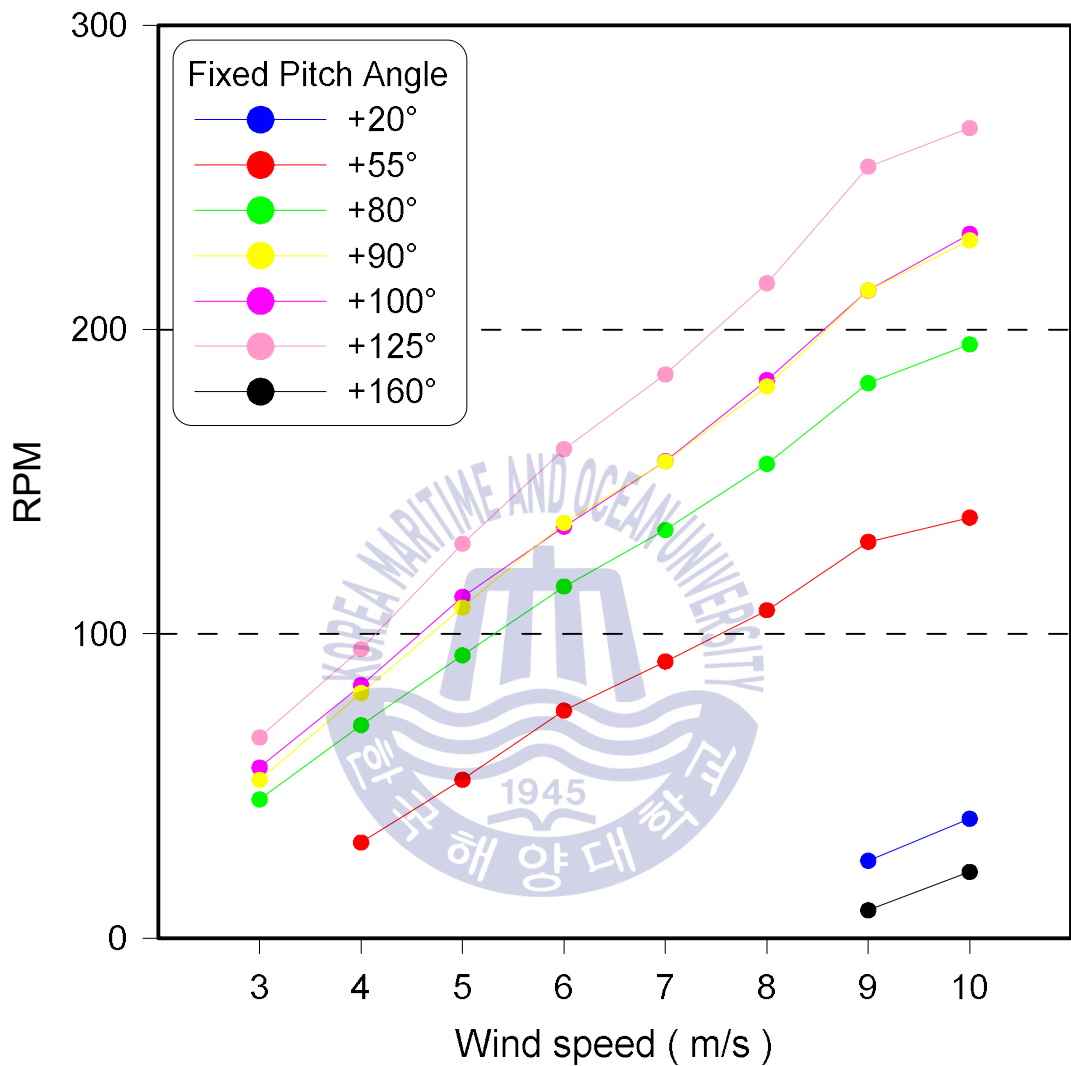


Fig. 4.15 The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in no load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7

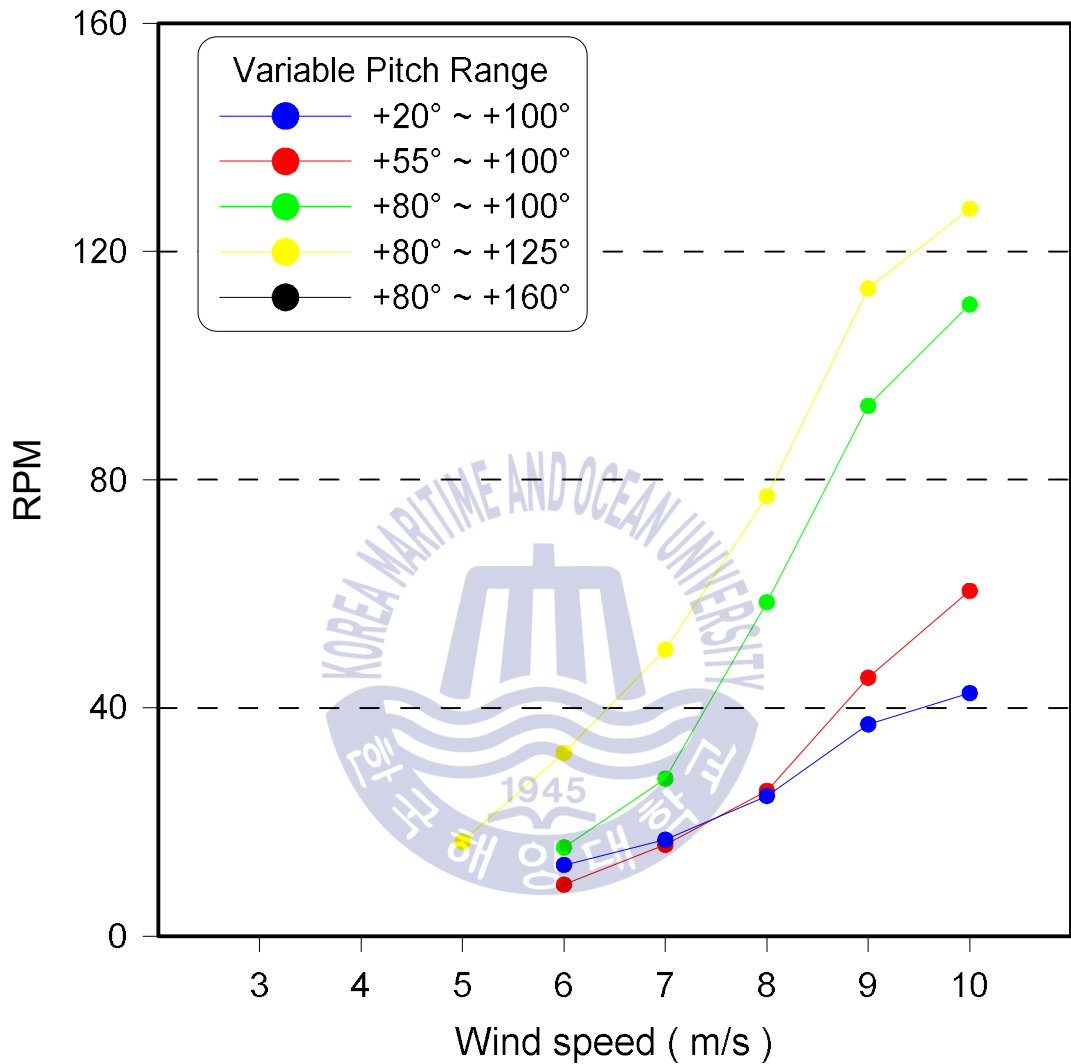


Fig. 4.16 The RPM by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5

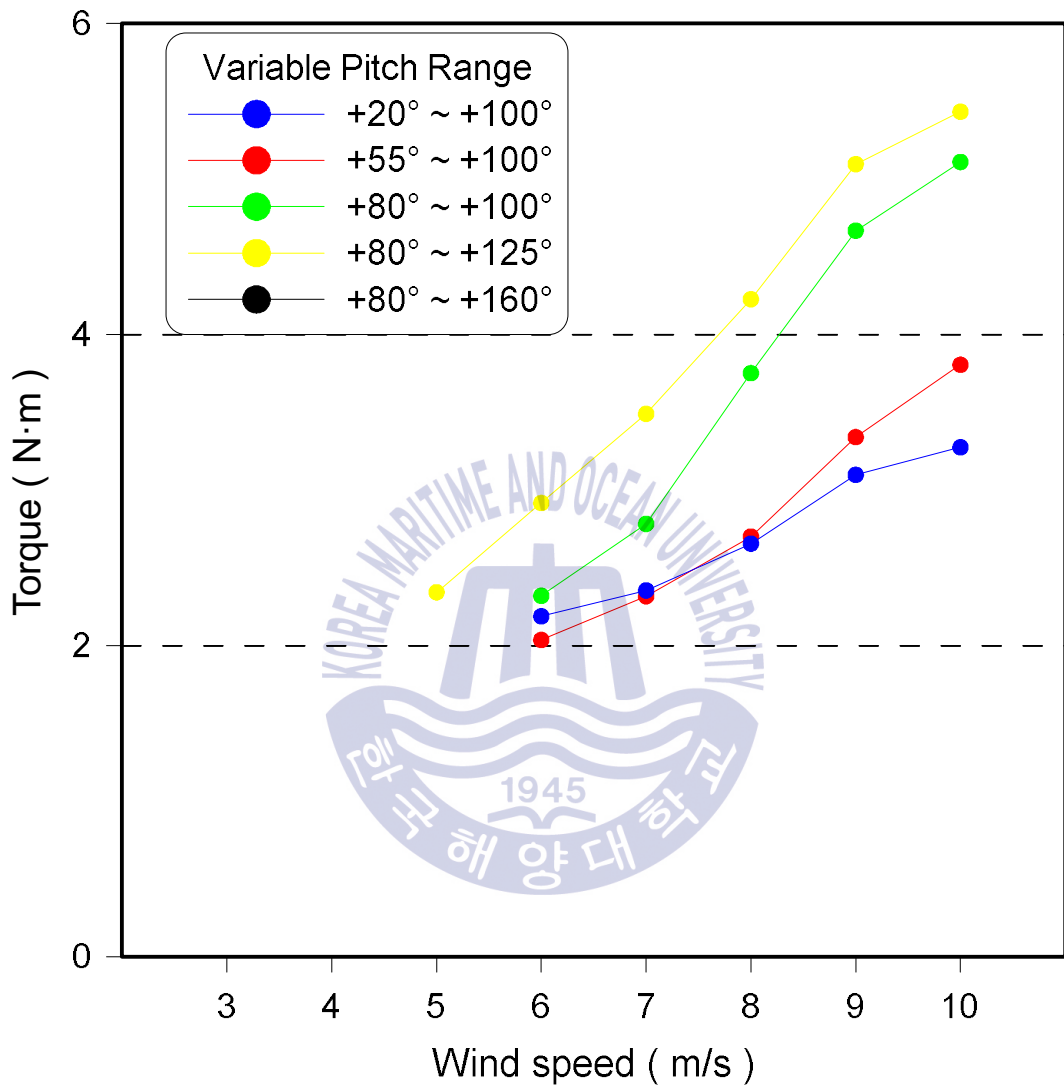


Fig. 4.17 The torque by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5



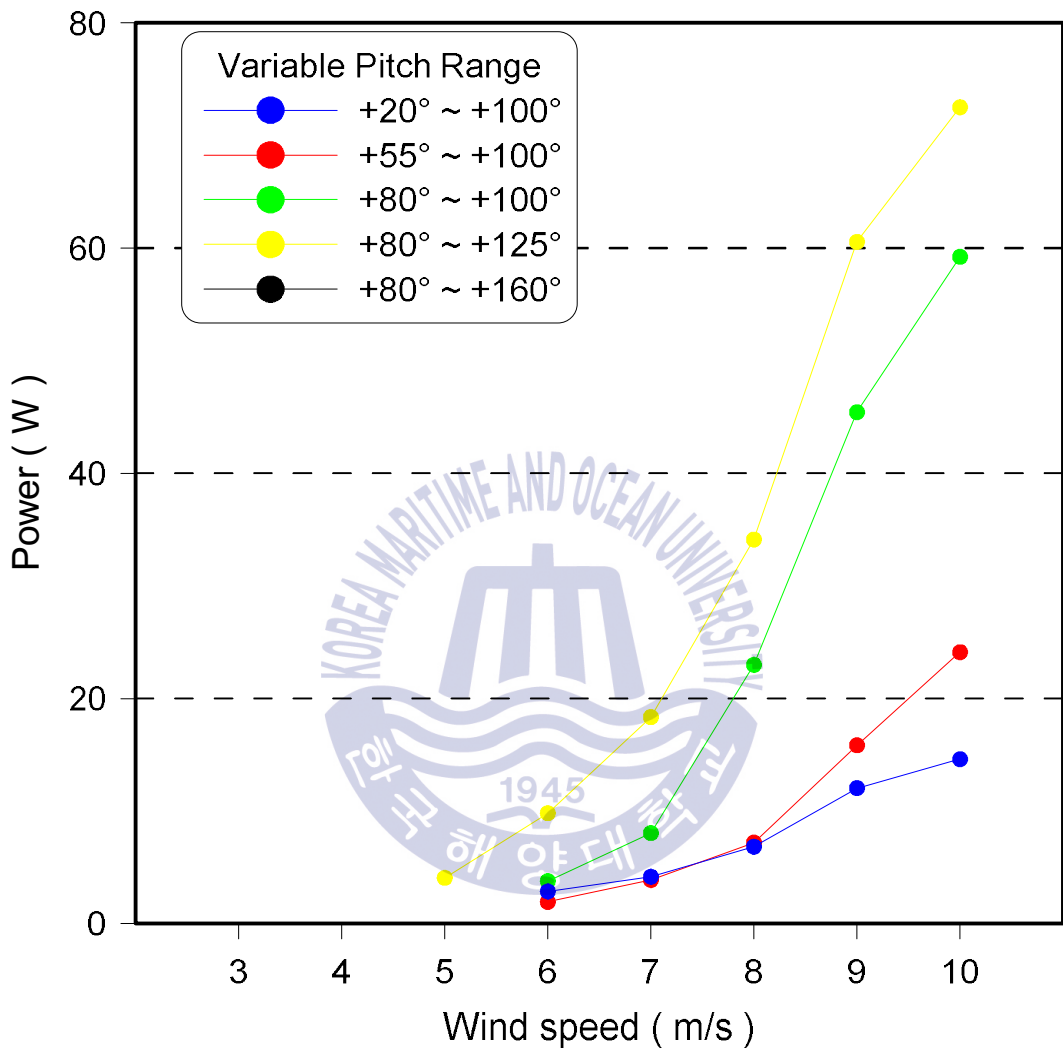


Fig. 4.18 The power by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 1 ~ case 5

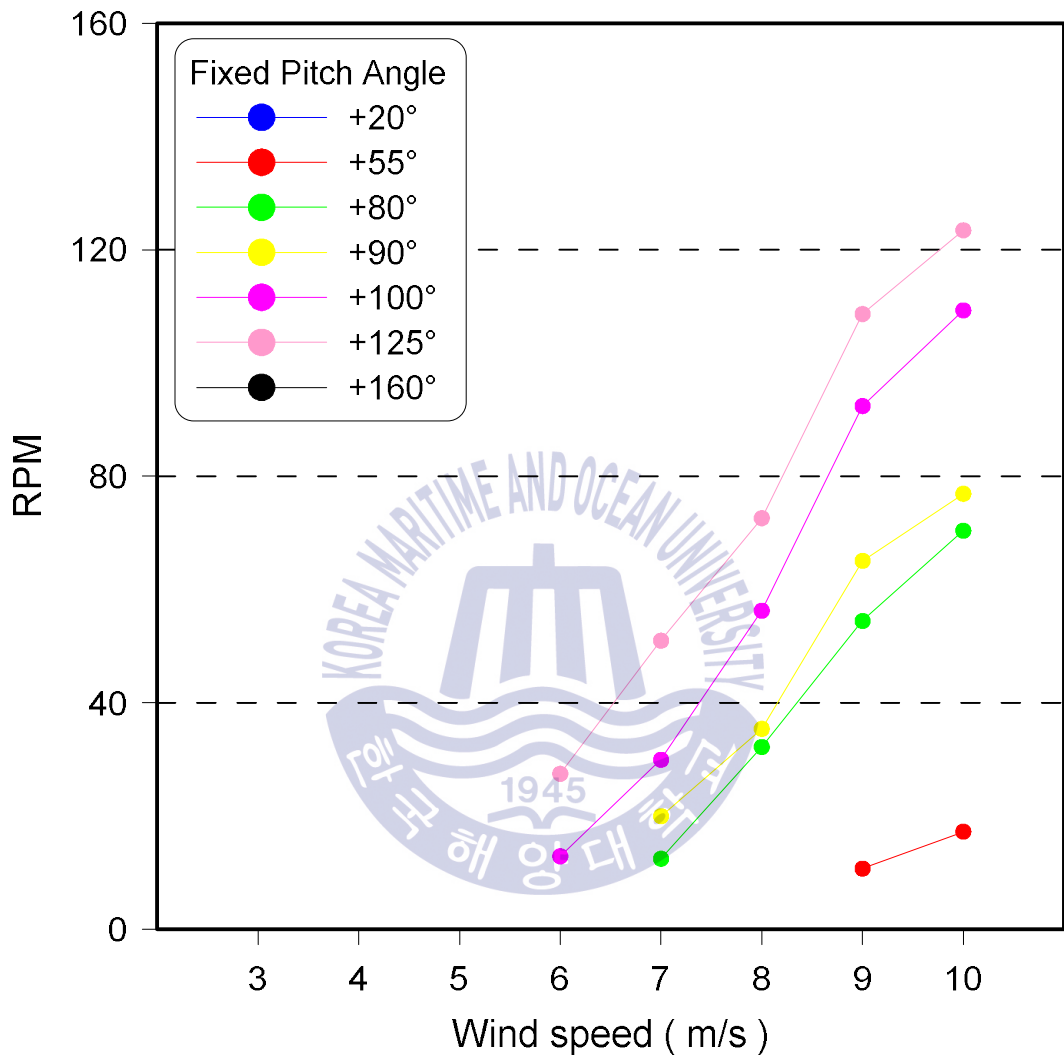


Fig. 4.19 The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7

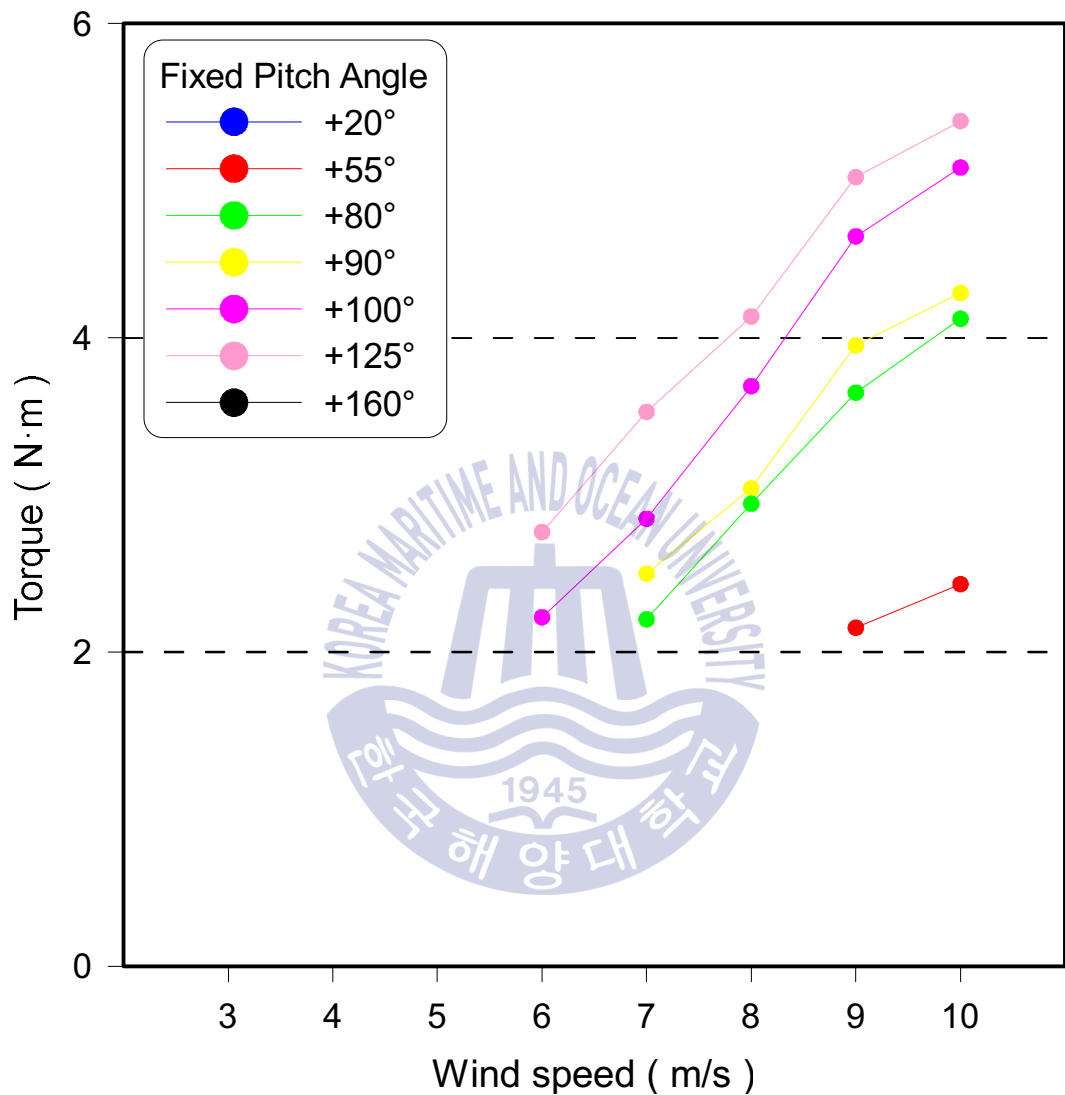


Fig. 4.20 The torque by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7

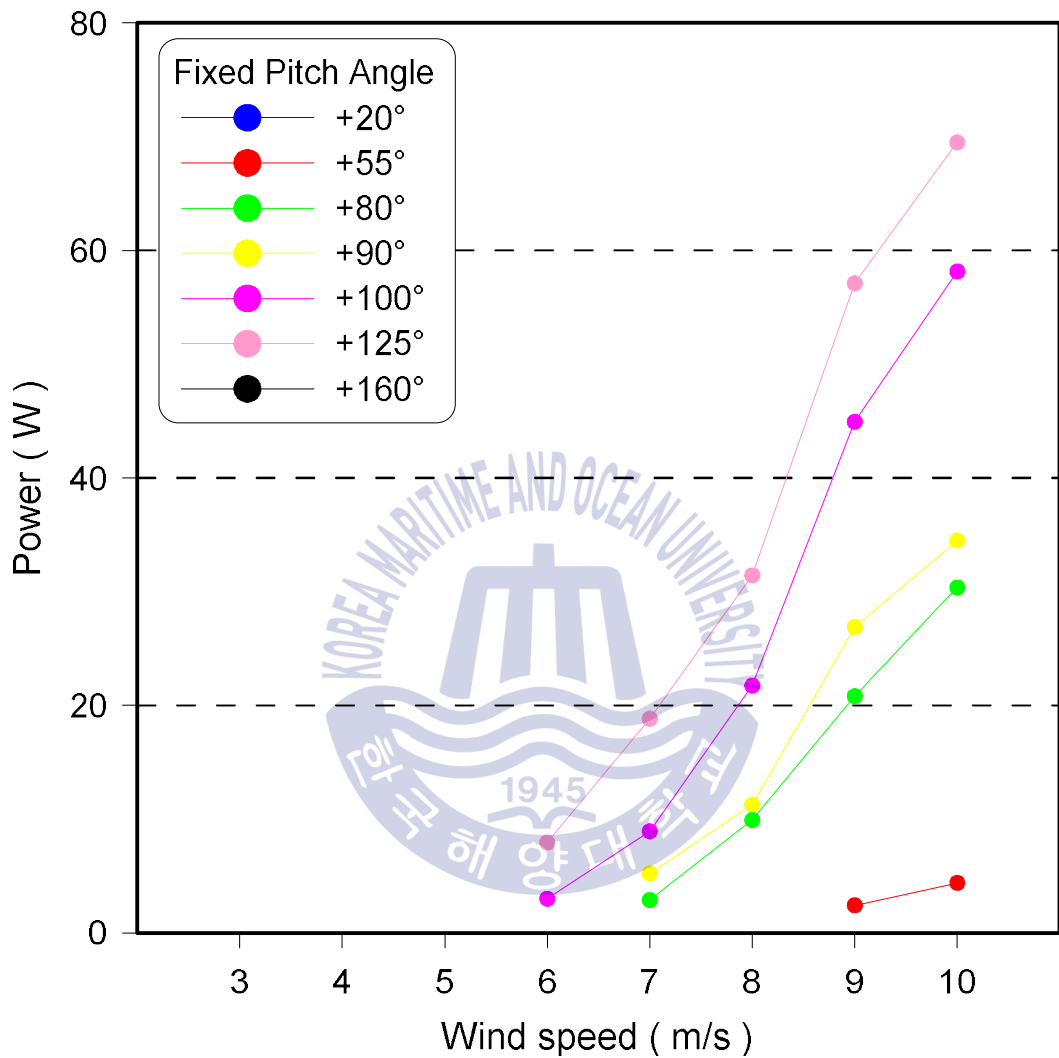


Fig. 4.21 The power by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 1 ~ case 7

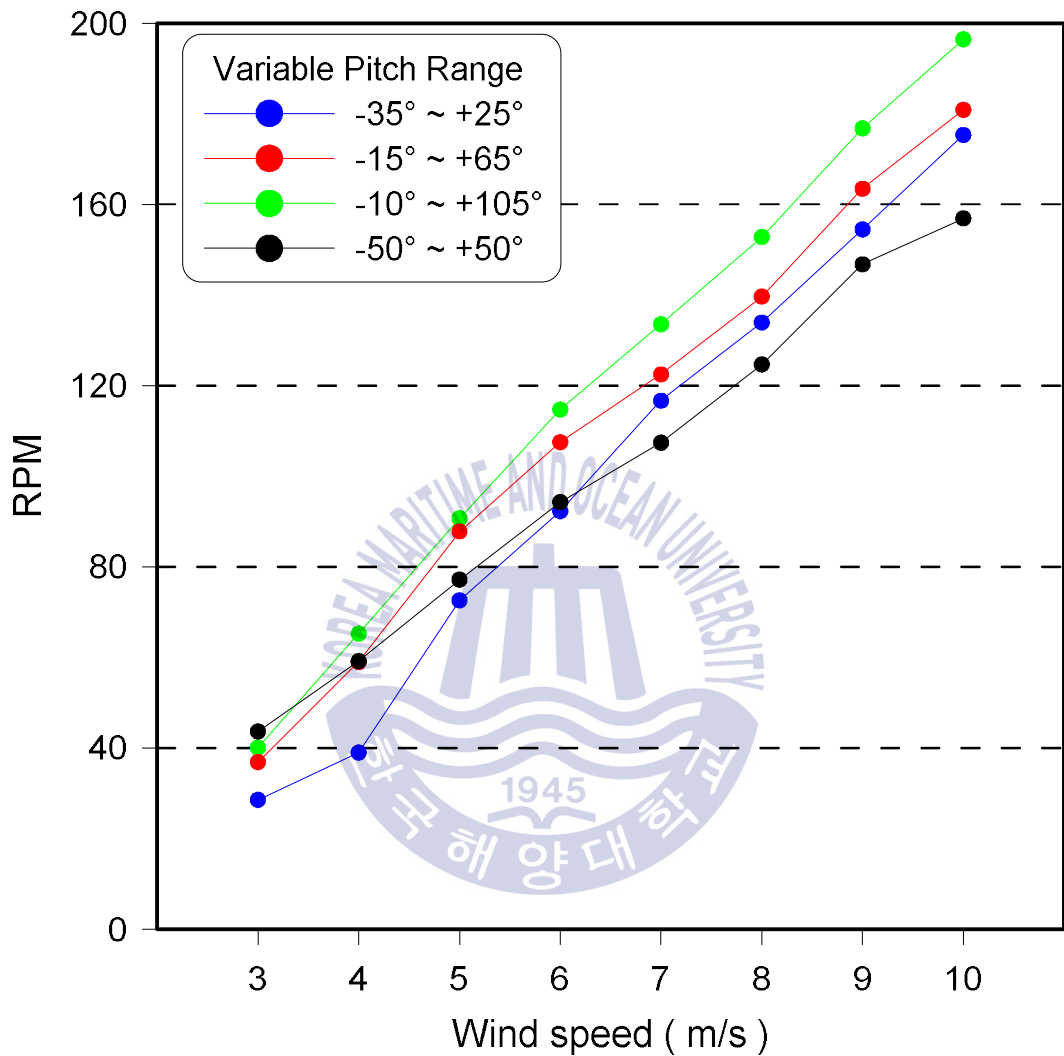


Fig. 4.22 The RPM by the wind speed following variable-pitch range in no load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9

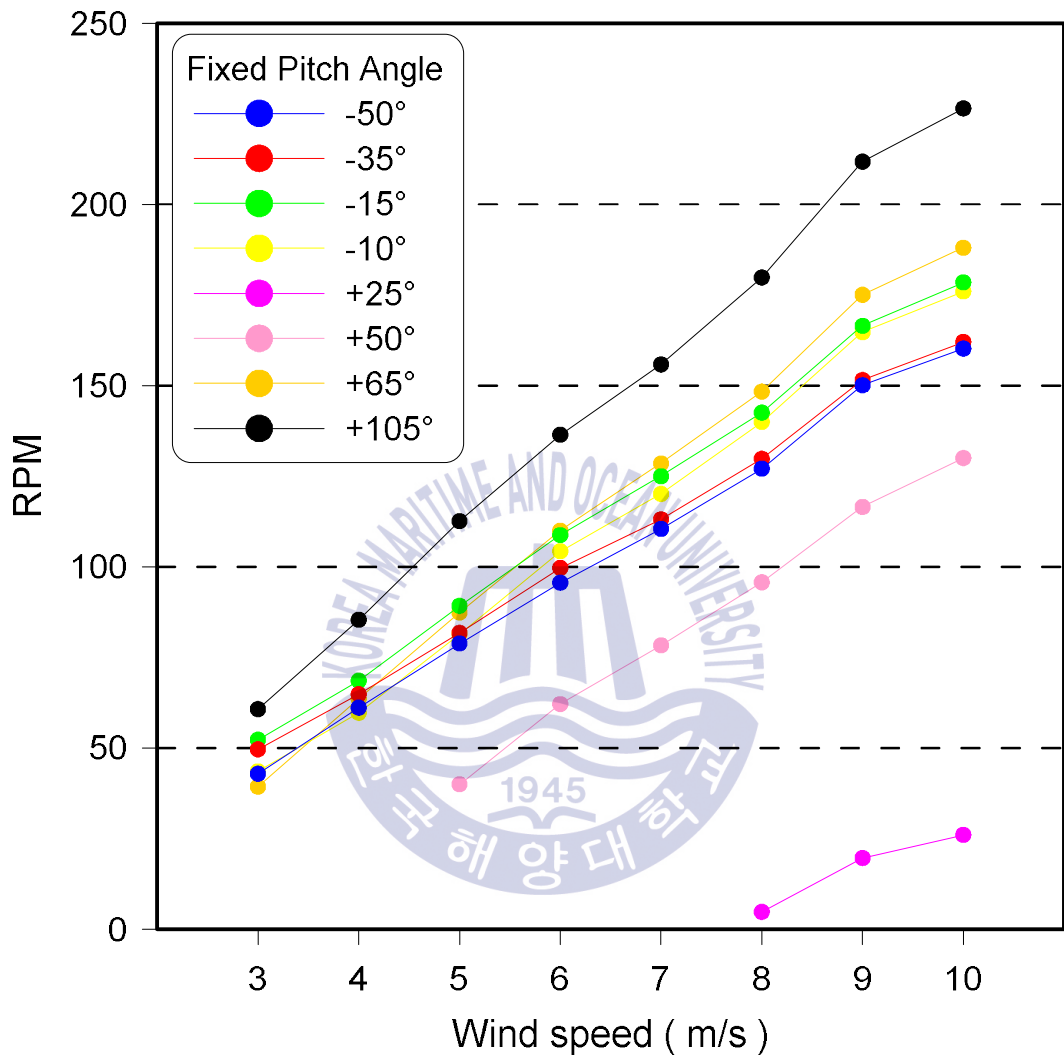


Fig. 4.23 The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in no load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15

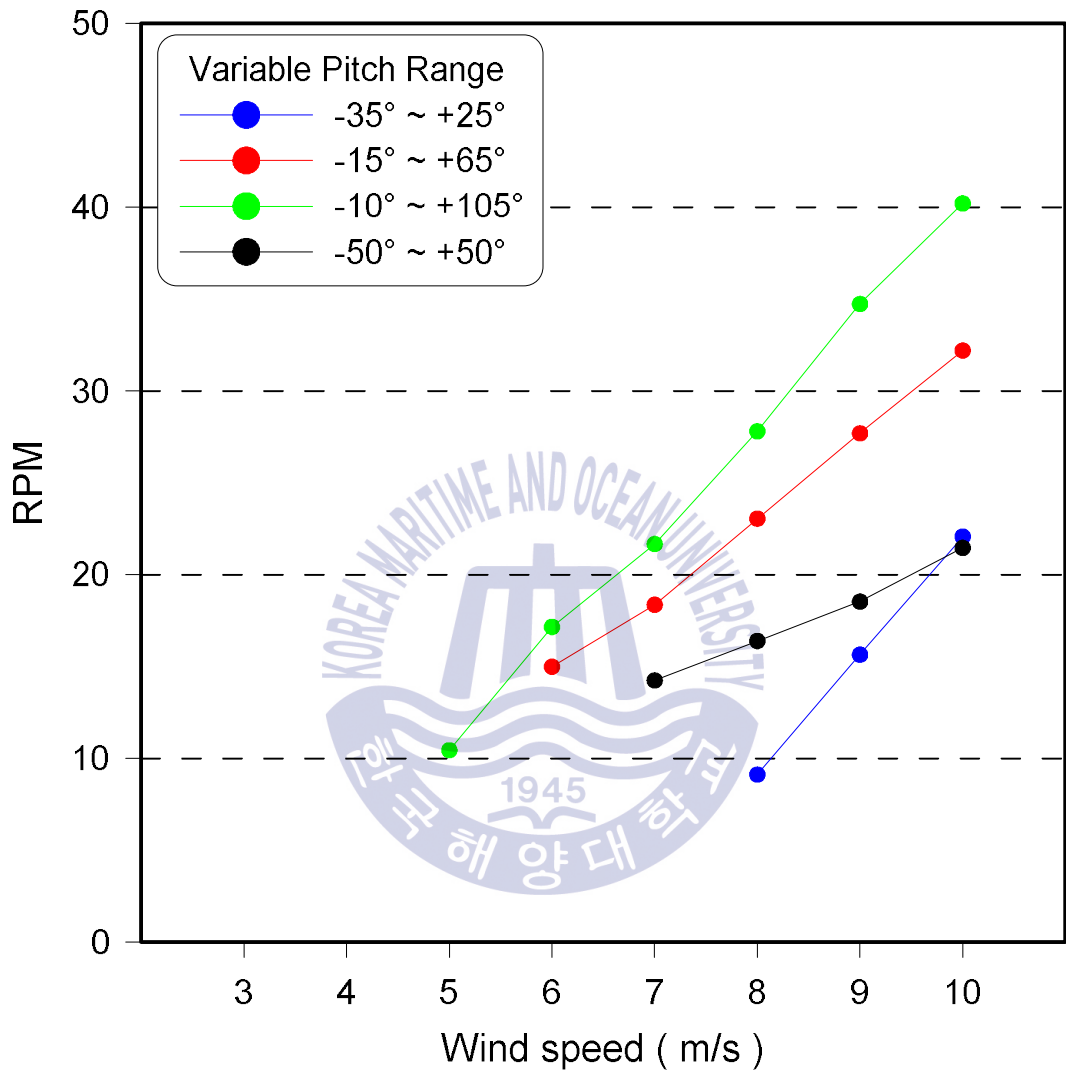


Fig. 4.24 The RPM by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9



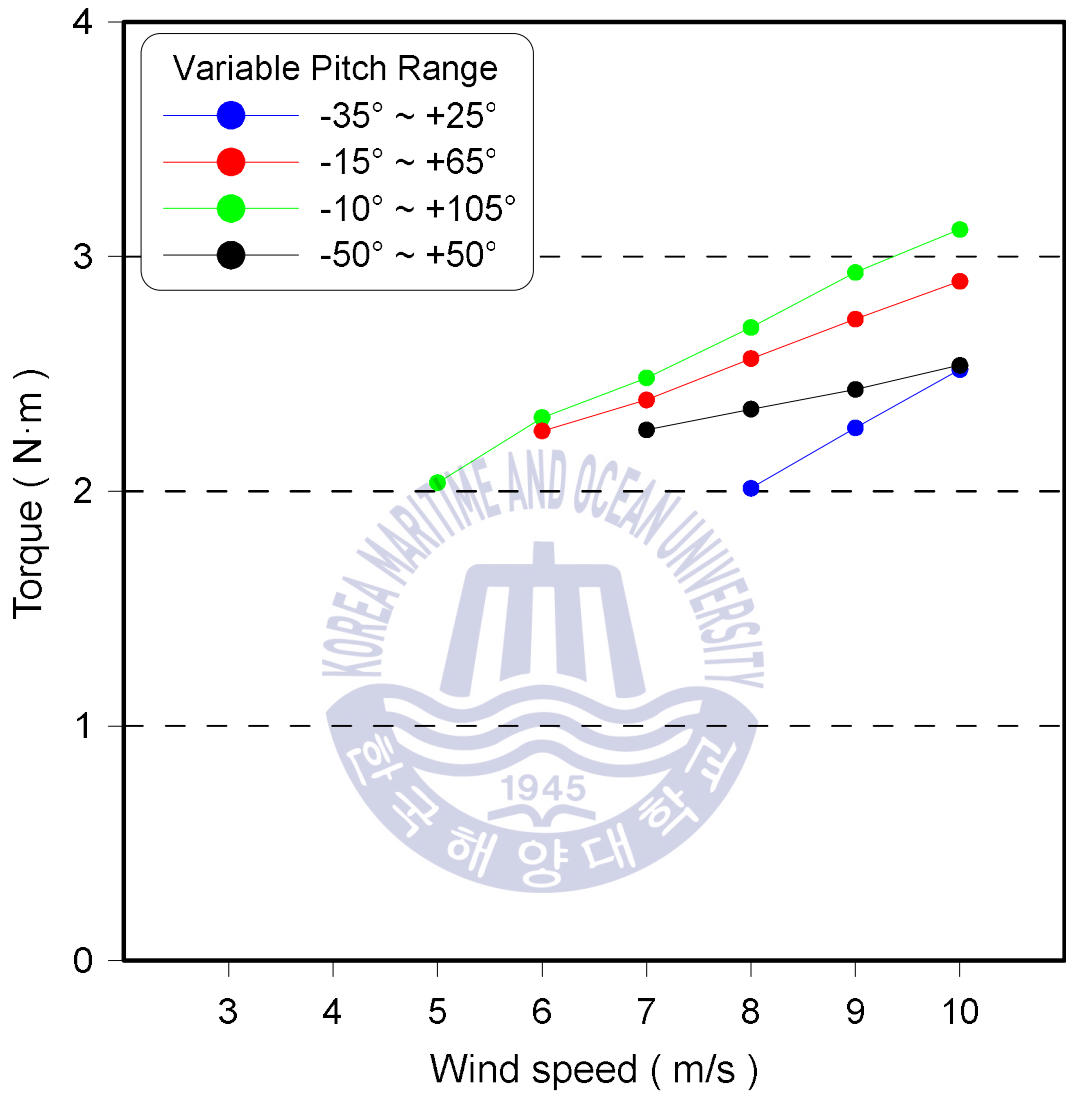


Fig. 4.25 The torque by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9

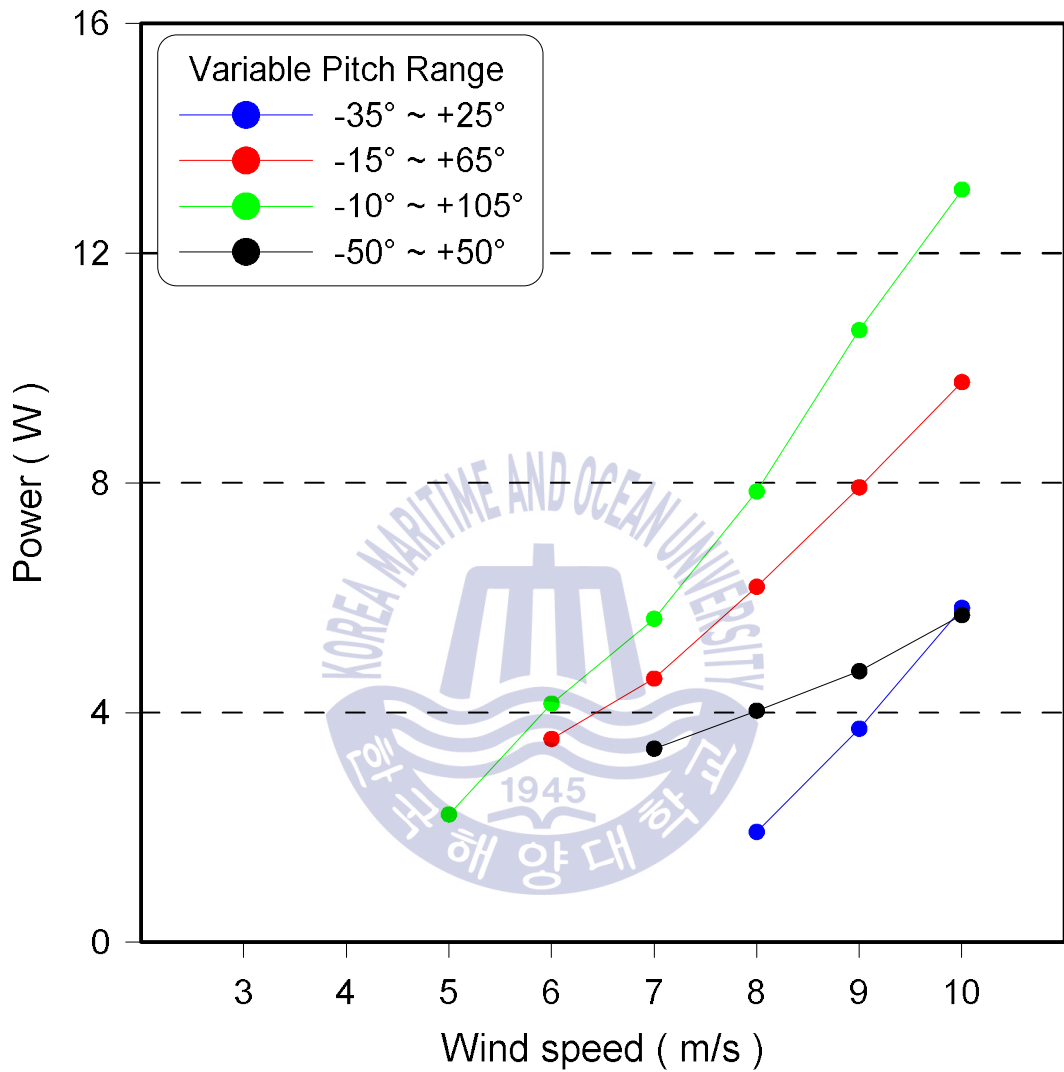


Fig. 4.26 The power by the wind speed following variable-pitch range in load condition - Variable-pitch range case 6 ~ case 9

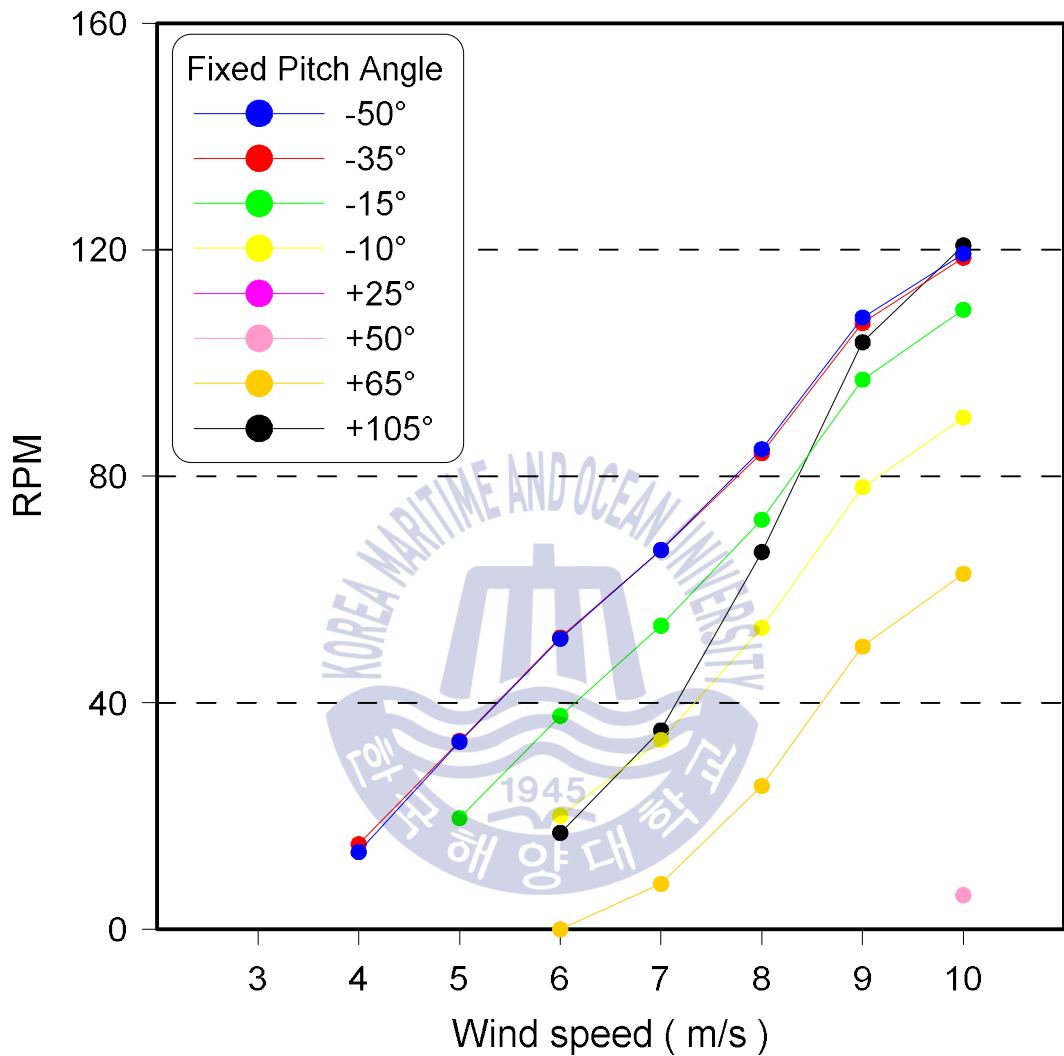


Fig. 4.27 The RPM by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15

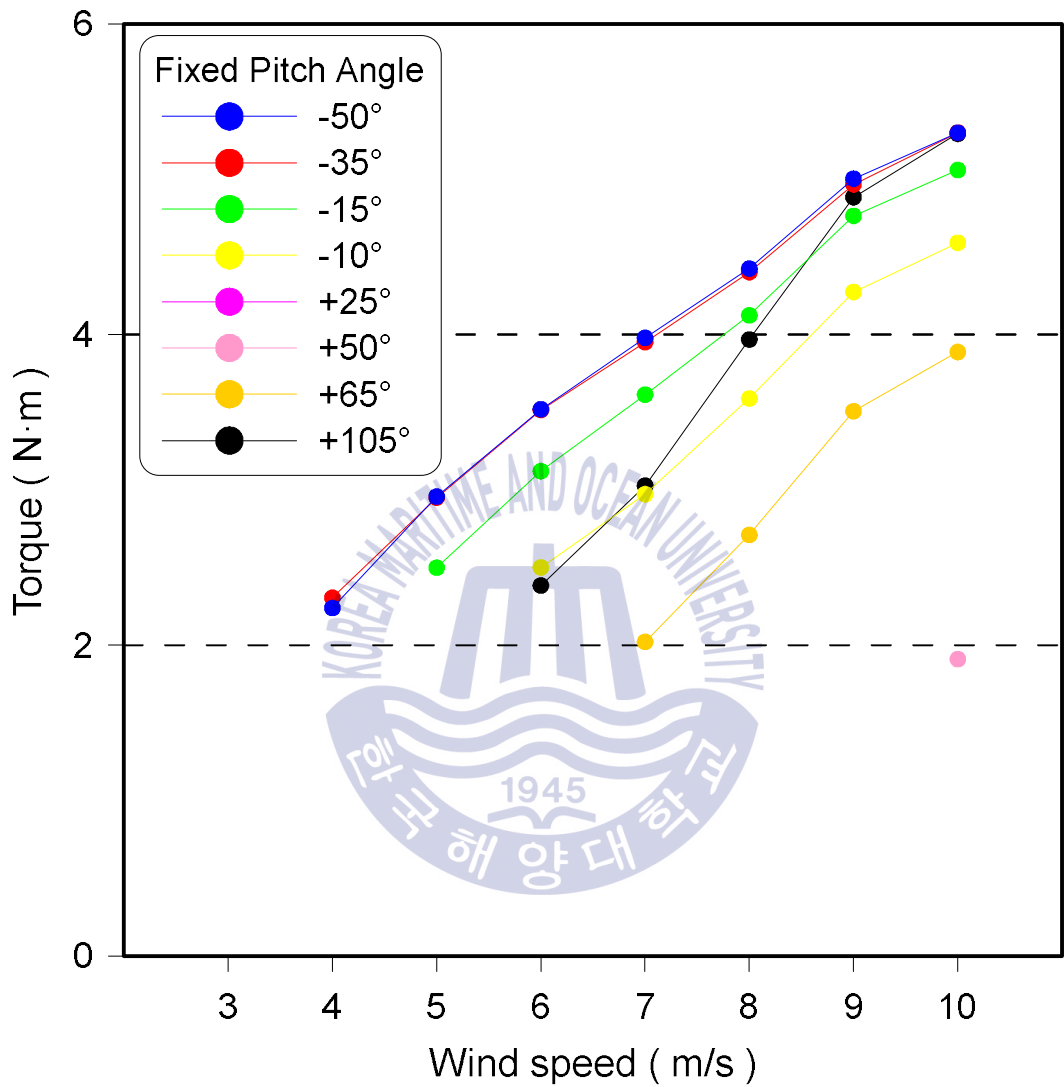


Fig. 4.28 The torque by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15

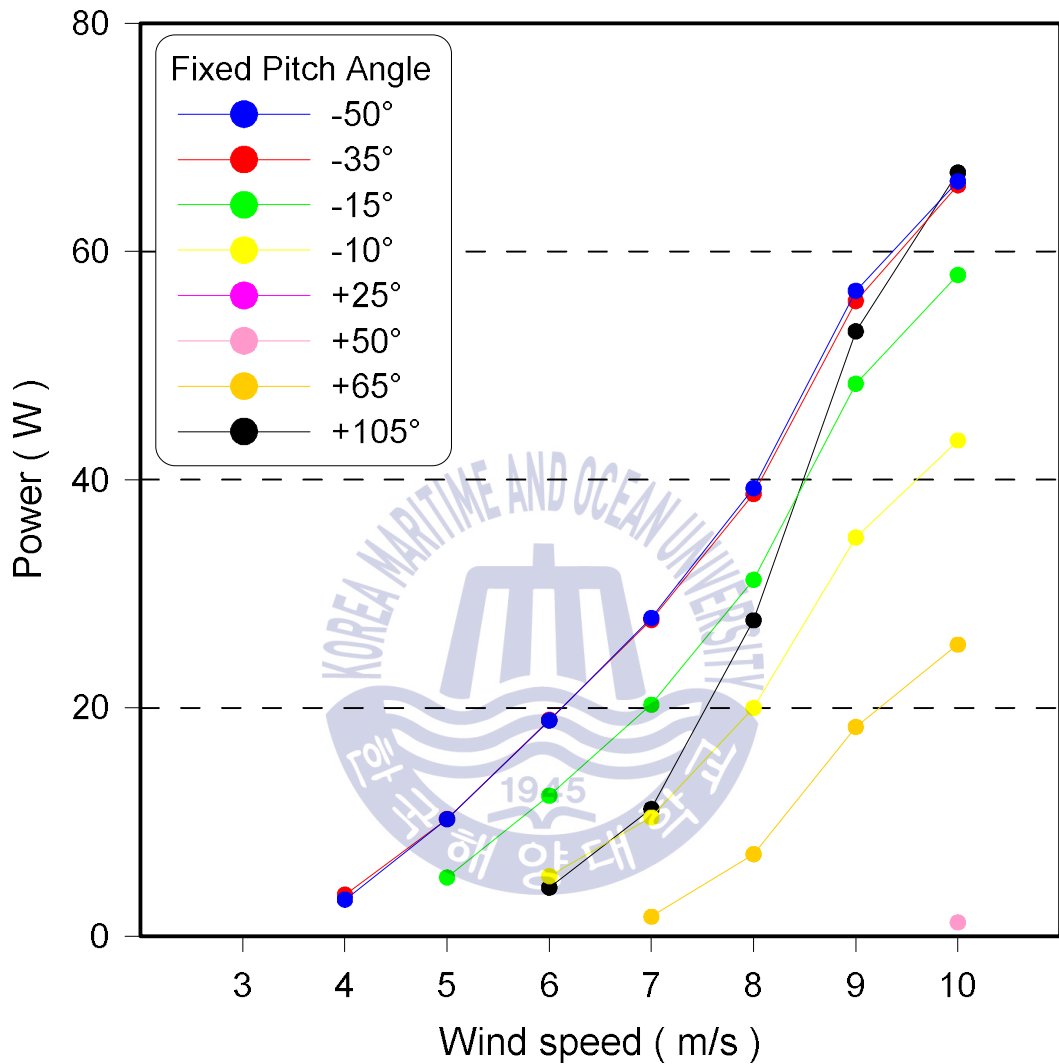


Fig. 4.29 The power by the wind speed following fixed pitch angle in load condition - Fixed pitch angle case 8 ~ case 15

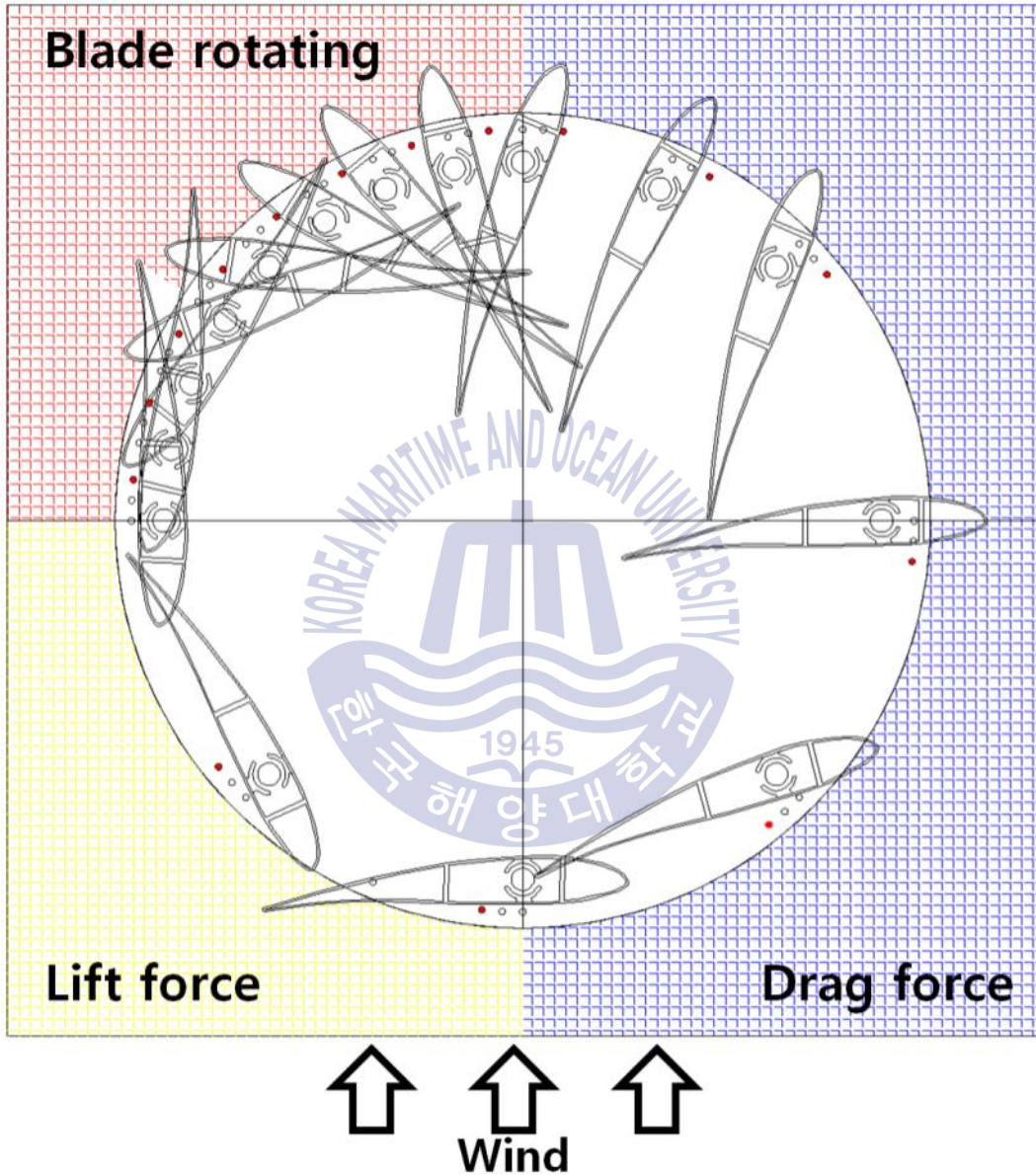


Fig. 4.30 The condition of blades by the positions following variable-pitch range  $-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$

#### 4.4 해양 공학수조를 이용한 풍력발전 실험

실제 해상 환경 하중인 해상풍과 해양파를 재현하기 위해 중소조선연구원의 해양 공학수조에서 실험을 실시하였다. 해양 공학수조의 제원은 길이 28 m, 폭 22 m, 깊이 3 m 이고 실험 수심은 2 m 이다. 실험에 사용된 풍속은 바람발생 장치와 풍속계간 2.8 m 위치에서 3회에 걸쳐 5분간 측정된 풍속의 평균값이다. 풍속 범위는 1 m/s에서 8 m/s까지 이다. Fig. 4.31과 Fig. 4.32는 풍력 발전기의 고정 여부에 따른 실험 사진 및 배치도이다. 풍력 발전기의 고정 여부에 따른 두 가지 조건에서의 RPM값을 비교하여 해양파에 따른 출력특성을 분석하였다. Fig. 4.33과 Table 4.9는 해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력 발전 실험에서 사용된 바람 발생장치 사진과 제원을 나타내는 표이다.

실험 측정은 각 풍속에서의 풍력발전기의 고정 여부, 피치 가변 범위, wave의 유무에 따른 RPM을 측정 한다. 가변 피치형 부유식 수직축 풍력발전기의 특성을 파악하기 위해 본 연구에서 사용된 부유식 구조물인 스파 타입의 부유체는 다른 부유식 구조물 보다 흡수가 매우 깊고 무게중심이 낮다. 따라서 무게중심의 위치가 전체 시스템에 큰 영향을 주기 때문에 안정적인 운동응답을 보이기 위해서는 무게중심을 낮추는 것이 중요하다. 본 연구에서는 발전기 전체 시스템의 무게중심을 낮추기 위해 부유체의 상단부에 고정되는 수직축 풍력발전기 지지대의 지지축 길이를 190 mm로 제작하고 토크측정기와 스테핑 모터를 제거하였다. 따라서 해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력실험에서는 무부하 상태에서 비접촉식 RPM 측정기를 이용하여 RPM값을 측정하였다.

블레이드 피치 가변 범위는 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험에서 블레이드 피치 가변이 가장 활발하게 일어났던  $-35^{\circ} \sim +25^{\circ}$ ,  $-15^{\circ} \sim +65^{\circ}$ ,  $-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$  3가지 조건으로 실험을 진행하였다. Table 4. 10은 해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험 조건인 고정 여부, 피치 가변 범위, wave를 나타낸 것이다.

불규칙파는 유의파고( $H_{1/3}$ , Significant wave height) 0.1235 m와 평균주기( $T$ , Mean period) 1.755 s인 ITTC 스펙트럼을 사용하였다.



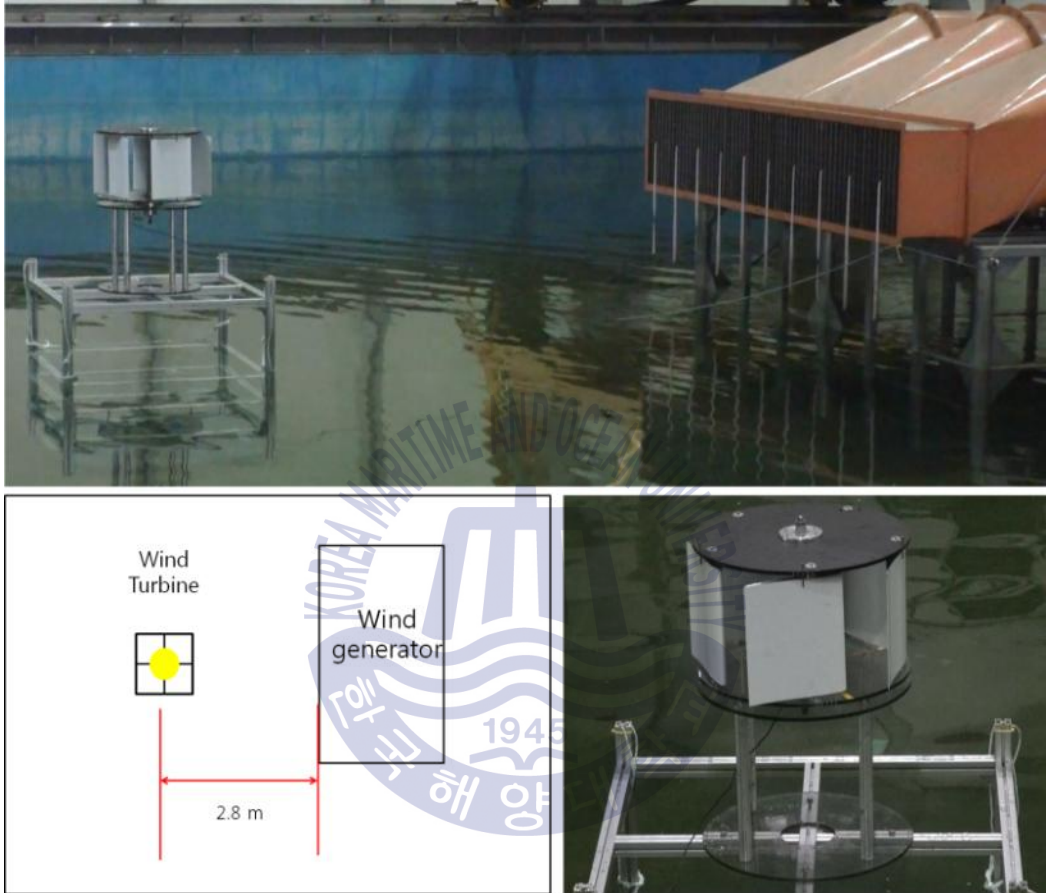


Fig. 4.31 The wind turbine test is used with the ocean engineering basin  
- fixed wind turbine

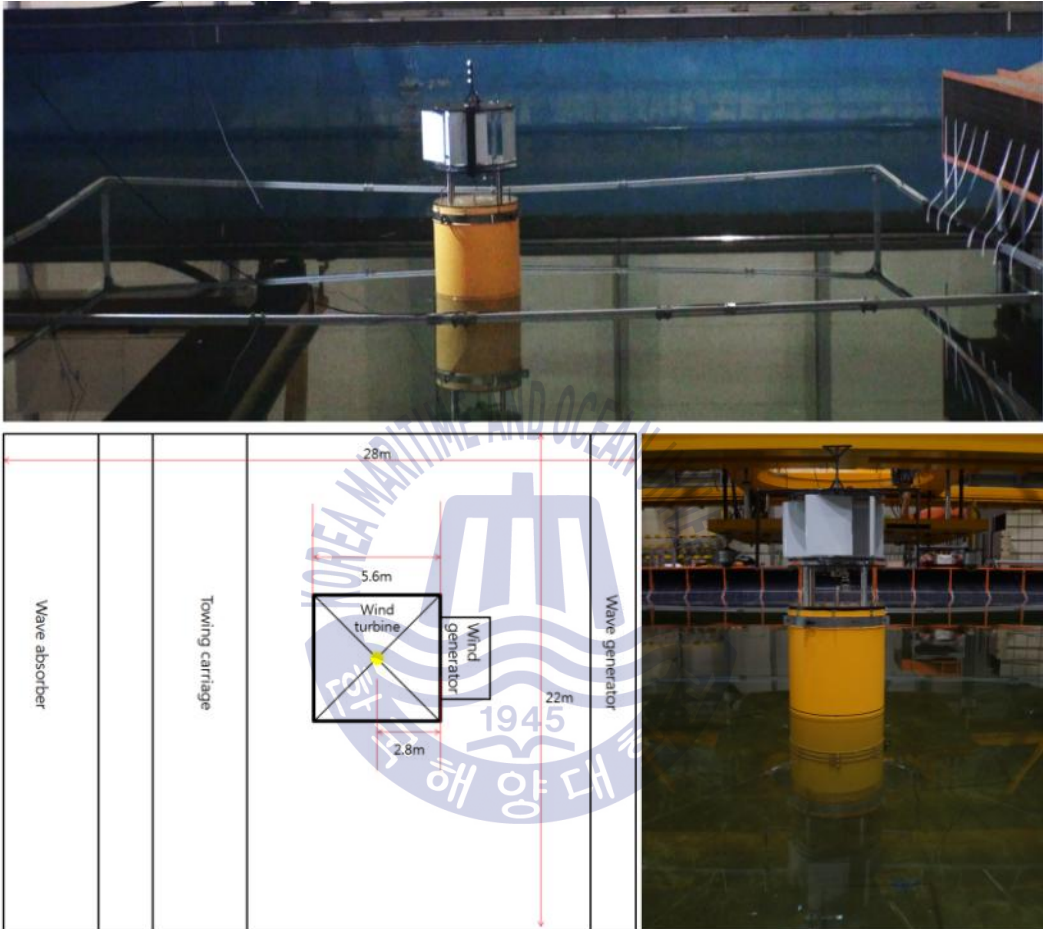


Fig. 4.32 The wind turbine test is used with the ocean engineering basin - non fixed wind turbine

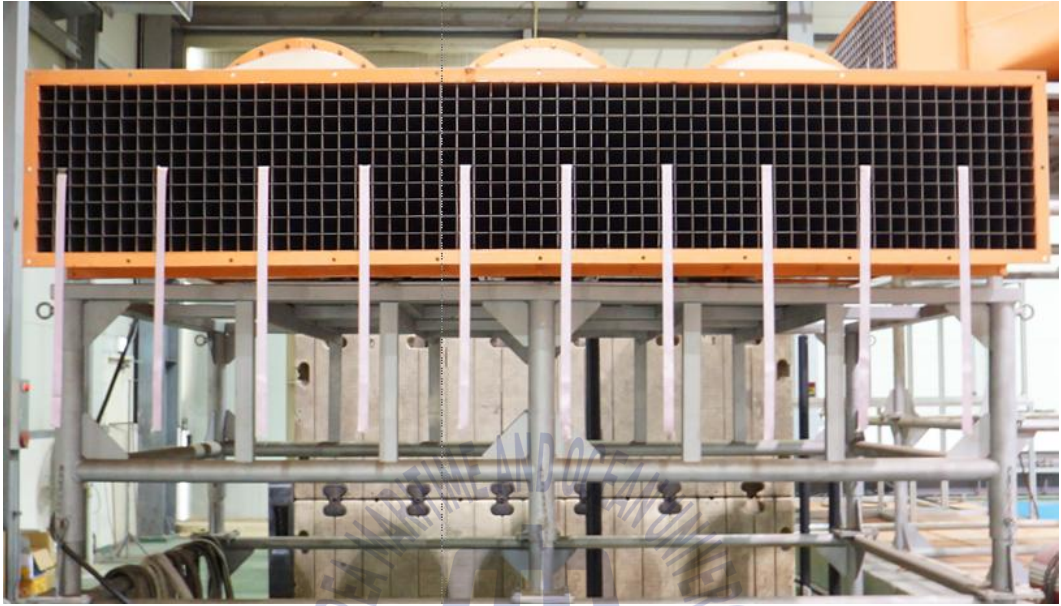


Fig. 4.33 Wind generating system in RIMS

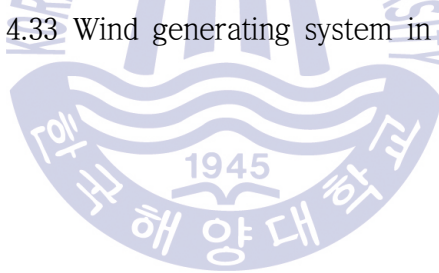


Table 4.9 Specifications of wind generating system in RIMS

Type	Axial_fan
Maximum wind speed	about 8 $m/s$
Air volume	400 $m^3/min$ / set at 25 $mmAq$

Table 4.10 Design parameters for experimental condition

No.	Wind turbine fixed or non fixed	Variable-pitch range	Wave	
1	fixed	$-35^{\circ} \sim +25^{\circ}$	-	
2	fixed	$-15^{\circ} \sim +65^{\circ}$		
3	fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$		
4	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	-	
5	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			1.6 s	0.066 m
6	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			1.8 s	0.084 m
7	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			2.0 s	0.104 m
8	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			2.2 s	0.126 m
9	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			2.4 s	0.075 m
10	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			2.6 s	0.088 m
11	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			2.8 s	0.102 m
12	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Period	Height
			3.0 s	0.117 m
13	non fixed	$-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$	Irregular wave	

#### 4.5 해양 공학수조를 이용한 풍력발전 실험 결과에 대한 고찰

Fig. 4.34와 Fig. 4.35는 풍력발전기가 고정된 상태에서의 피치 가변 범위에 따른 풍속별 RPM 시간이력을 나타낸 것이다. 해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험에서 사용된 비접촉식 RPM 계측기는 회전축의 RPM값을 정수형으로 처리하기 때문에 시간이력 그래프가 매끄럽지 못한 형태를 보인다. Fig. 4.36은 풍력발전기가 고정된 상태에서 각각 피치 가변 범위에 따른 풍속별 평균 RPM을 나타낸 것이다. 피치 가변 범위  $-35^{\circ} \sim +25^{\circ}$  에서는 모든 풍속에서 풍력 발전기가 기동하지 않았고 피치 가변 범위  $-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$  에서 가장 높은 RPM을 확인 하였다. 피치 가변 범위  $-35^{\circ} \sim +25^{\circ}$  의 경우 2차원 조파수조를 이용한 풍동실험에서도 가장 낮은 출력값을 보였다.

해양 공학수조를 이용한 실험 결과 RPM값이 2차원 수조를 이용한 풍동실험 결과에 비해 낮게 나타난다. 이는 실험환경 조성에 있어서 2차원 수조를 이용한 풍동실험 환경에 비해 해양 공학수조에서의 실험은 풍력발전기와 바람발생장치의 거리가 1.5 m에서 2.8 m로 약 2배 정도 멀어져 풍량이 적어졌기 때문이다. 또한 2차원 수조의 풍동환경과는 달리 해양 공학수조의 바람발생장치의 바람은 현장실험에 가까운 바람이라고 할 수 있다.

Fig 4.37은 규칙파에 따른 수직축 풍력발전기의 상하동요 진폭응답함수(Heave RAO)를 나타낸 그래프이고 Fig 4.38은 피치 가변 범위  $-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$  에 대한 풍속 8 m/s에서의 파랑중 RPM값을 나타낸 것이다. 부유식 수직축 풍력발전기의 출력을 상하동요 진폭응답함수와 비교 했을 때 상하동요가 커질 때 RPM이 감소하는 것으로 보인다. 그러나 RPM값이 감소하는 추가적인 이유는 부유식 풍력발전기의 상하동요로 인해 바람발생장치의 유효 바람 발생면을 벗어나기 때문인 것으로 보인다.



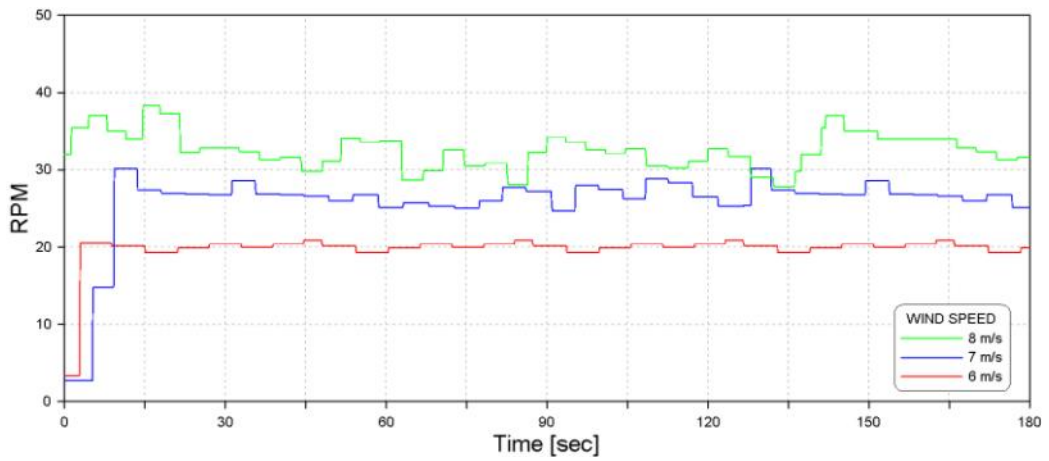


Fig. 4.34 The RPM time history by the wind speed following variable - pitch range  $-15^{\circ} \sim +65^{\circ}$  in the fixed wind turbine condition

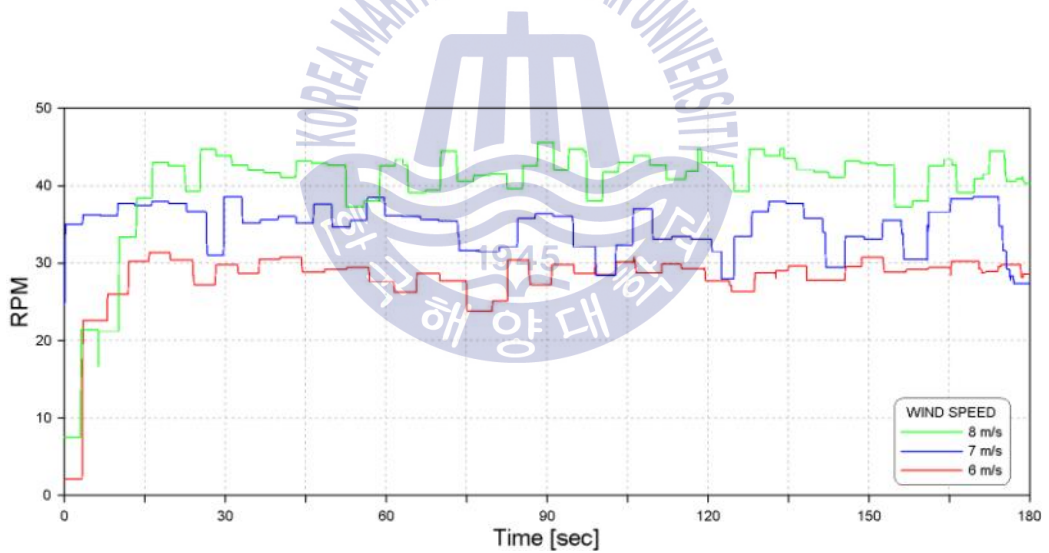


Fig. 4.35 The RPM time history by the wind speed following variable - pitch range  $-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$  in the fixed wind turbine condition

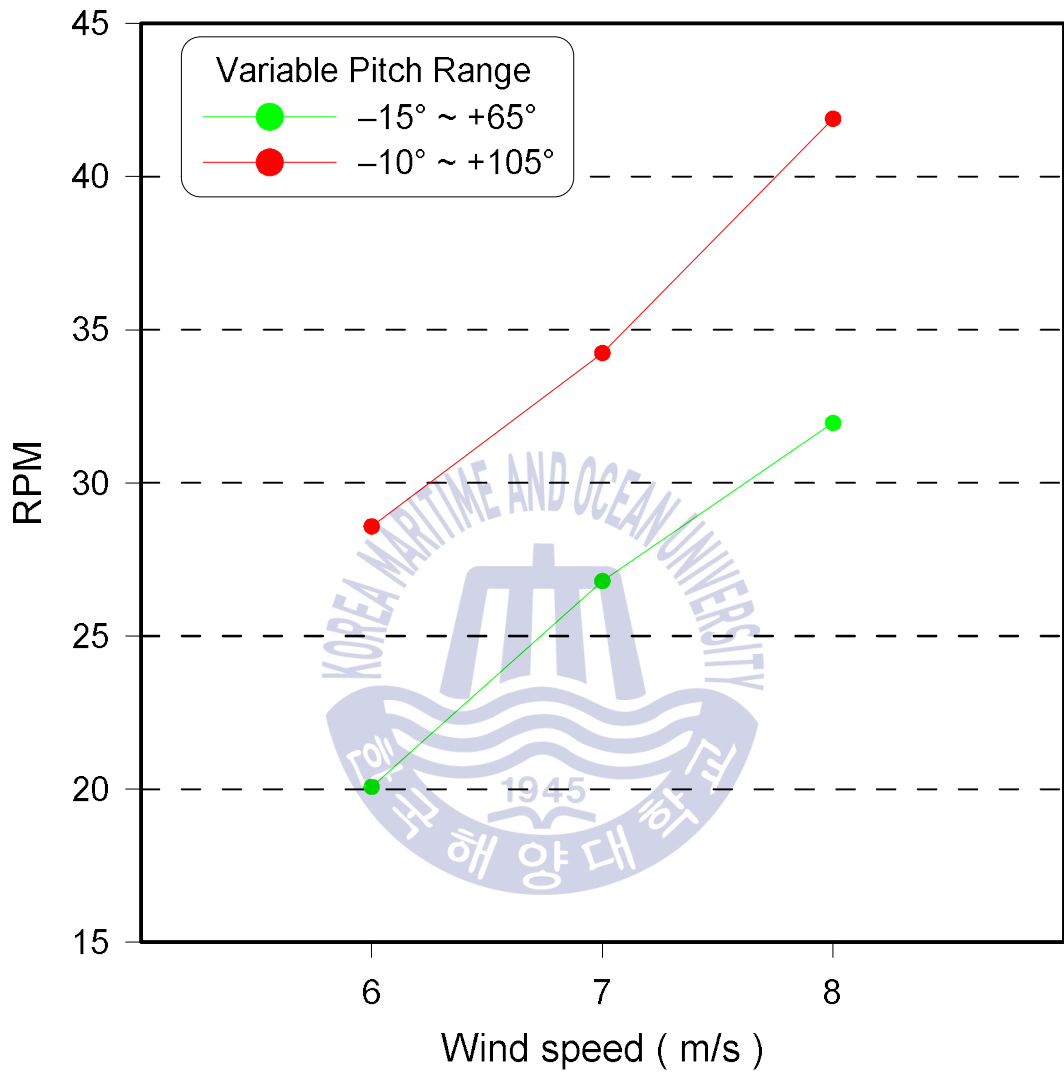


Fig. 4.36 The RPM by the wind speed following variable-pitch range in the fixed wind turbine condition



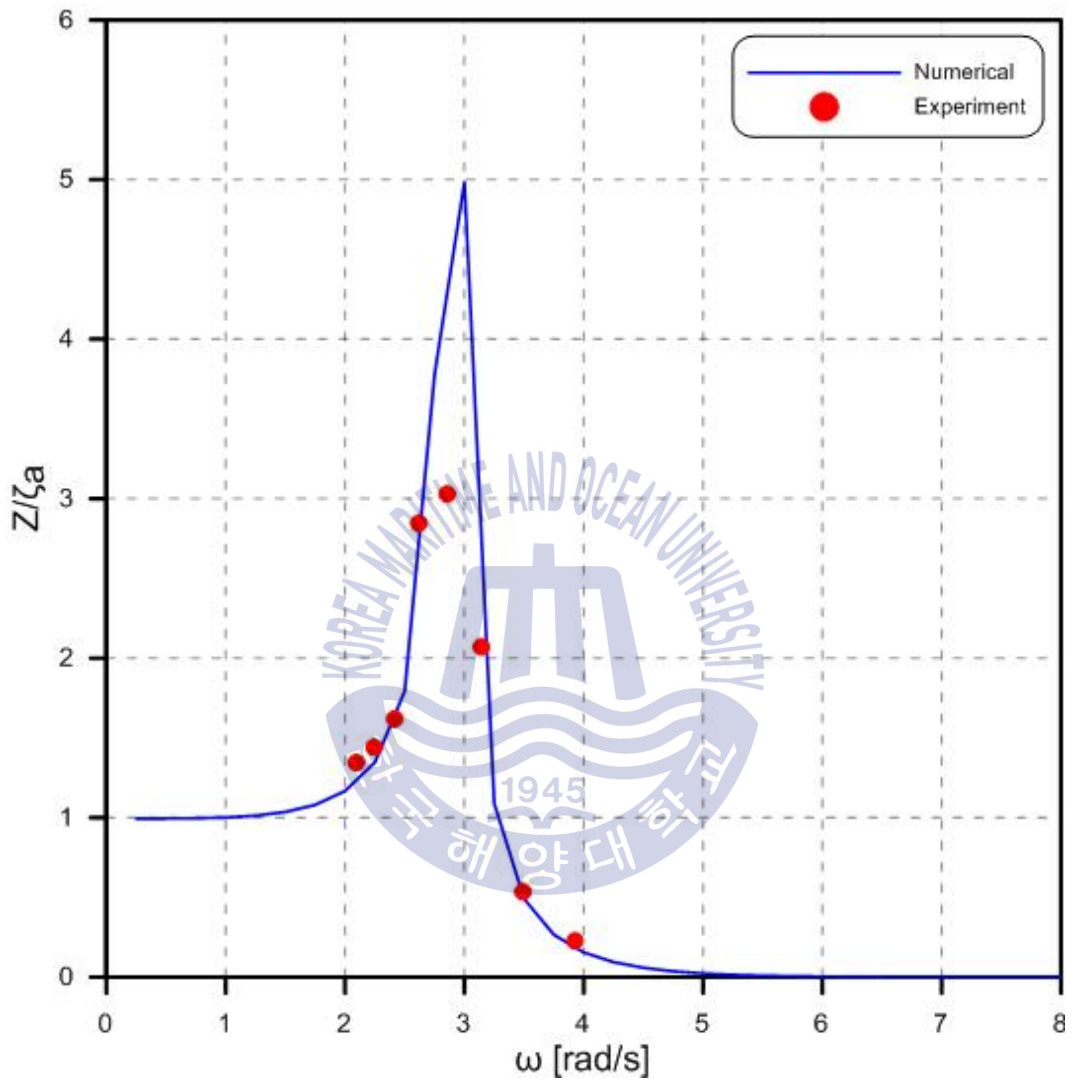


Fig. 4.37 Measured heave response of floating VAWT in regular waves

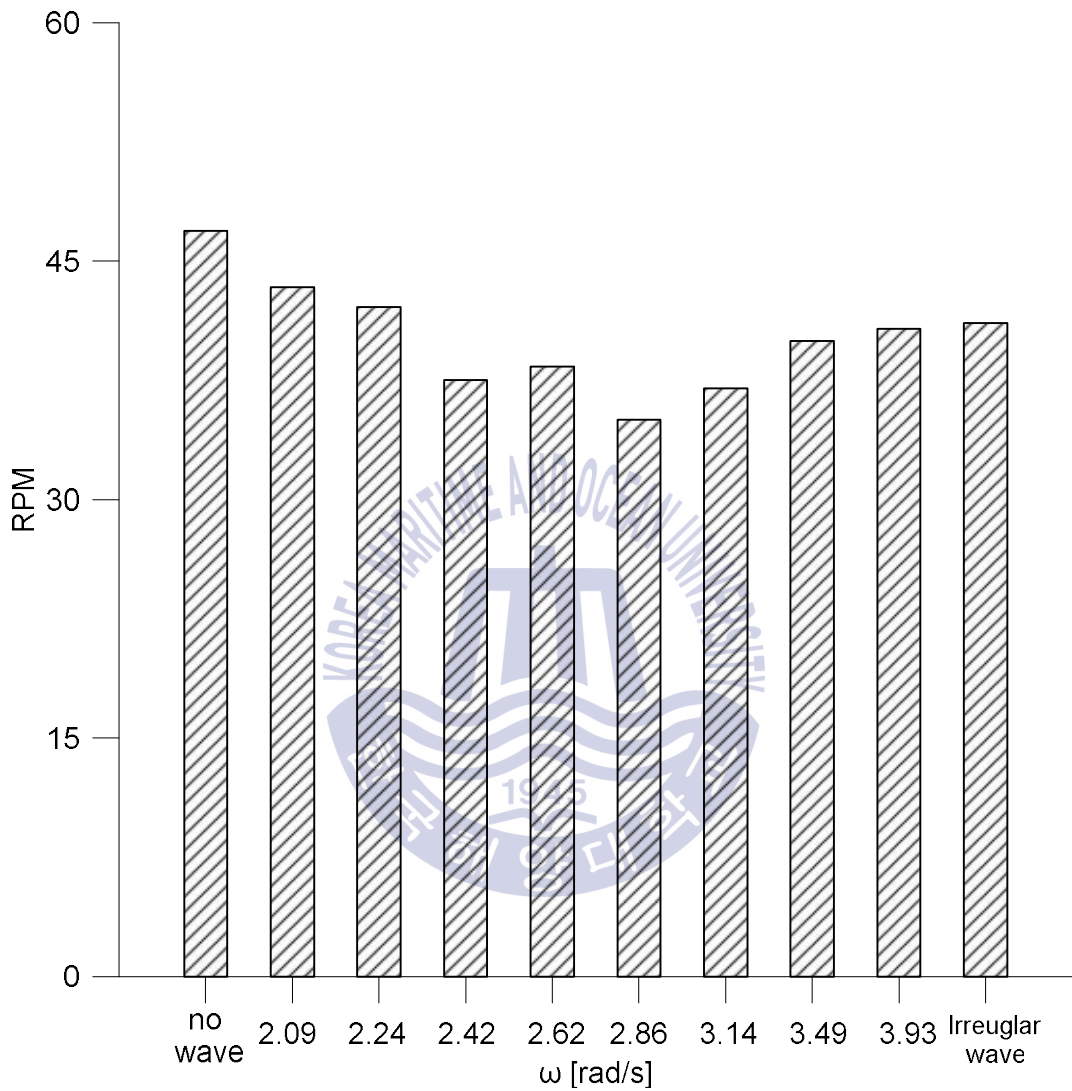


Fig. 4.38 The RPM by the wave following the wind speed 8 *m/s* and variable-pitch range  $-10^{\circ} \sim +105^{\circ}$

## 제 5 장 결론 및 향후과제

본 연구에서는 바람의 방향에 따라 로터의 블레이드가 회전함과 동시에 피치 각이 변하는 가변 피치형 부유식 수직축 풍력발전기의 발전 효율 및 해양 환경 하중에 의한 동적거동을 체계적으로 파악하고 부유체의 동적거동과 발전효율 간의 상호작용을 분석하였다. 한국해양대학교 해양시스템연구실의 2차원 조파 수조와 중소조선연구원의 해양 공학수조에서 실제 해양 환경 하중인 해상풍, 해양파를 재현하여 축소 모형시험을 시행하였다.

2차원 조파수조를 이용한 풍동실험을 통해 피치 가변 범위  $+80^{\circ} \sim +125^{\circ}$ , 피치 고정각도  $+125^{\circ}$  에서 최대 출력을 확인하였다. 또한 피치 가변 여부와는 무관하게 전반적인 RPM 차이는 크게 나타나지 않았지만 피치 각도가 변하는 조건에서는 발전 가능 풍속 범위가 확대되었다.

해양 공학수조를 이용한 부유식 풍력발전 실험을 통해 입사파의 영향을 받지 않도록 풍력발전기를 고정한 경우와 고정하지 않은 경우를 비교한 결과 부유체의 동적거동이 풍력발전기 출력에 미치는 영향은 적다. 즉 설계된 풍력발전기가 해상 환경 하중 하에서도 효율적으로 발전한다는 것을 나타낸다. 이러한 경향은 바람의 방향에 영향을 적게 받는 수직축 풍력발전기의 특성 그리고 스파 타입의 부유체에 적절한 풍력발전기 설계가 되었기 때문이다.

이상의 연구결과는 부유식 풍력발전기가 실제로 설치될 해양환경에 최적화된 피치 가변 범위 및 각도를 설계함으로써 발전효율을 향상시키고 동적거동의 안정성을 증대시킬 수 있다. 이후 블레이드가 피치 가변을 위해 회전하면서 발전기 자체에 주는 충격량을 줄이는 방안과 입사파에 적절한 부유식 풍력발전기의 중량 및 형상에 대한 추가 연구를 통하여 부유식 수직축 풍력발전기의 고효율화를 기대할 수 있다.

## References

- [1] 산업통상자원부, “중대형 풍력발전시스템 개발 및 운용평가에 관한 연구(로터시스템중점개발연구)”, 2001.
- [2] 황병선, 박승범, 김진욱, 박지상, 안일환, “Introduction to wind Energy and Technology”, 아진, 2014, p17~27.
- [3] The european offshore wind industry-key trends and statistics, report by the european wind energy association, 2013.
- [4] Korea Energy Management Corporation, “Introduction of Renewable Energy, Wind Power”, www.Energy.or.kr, 2013.
- [5] 한국전력공사, 자가발전 도서용 풍력발전기(10kW)개발, 2007.
- [6] Robert E. Sheldahl, Paul C. Klimas “Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through Aairfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines”, 1981.
- [7] 공창덕, 방조혁, 오동우, 정종철, 김학봉, 류지윤, “축소모델을 이용한 수평축 풍력발전 시스템용 회전날개의 공력실험에 관한 연구”, 한국항공우주학회 추계학술대회 논문집, 1998, pp. 62~65.

- [8] A. Robert E. Sheldahl, “Comparison of Field and Wind Turbine Darrieus Wind Turbine Data” Sandia National Laboratories., Energy report, 1981.
- [9] Martin, H. R., “Development of a Scale Model Wind Turbine for Testing of Offshore Floating Wind Turbine Systems” , The Graduate School of the University of Maine, 2011.
- [10] Manabu Takao, Takao MAEDA, Yasunari KAMADA, Michiaki OKI, Hideki KUMA, “A Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine with a Directed Guide Vane Row” Journal of Fluid Science and Technology, 2008.
- [11] 최현철, 김동현, 박강균, 이종욱, “해상 부이용 소형 수직축 풍력발전기 설계 및 전산해석” , 풍력에너지학회 춘계학술대회, 2010, p. 167-176.
- [12] 김민수, 이강수, 김만웅, 신현경 “5MW Spar type 부유식 해상 풍력발전기의 운동 해석” , 2011년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회.

