



### 저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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.

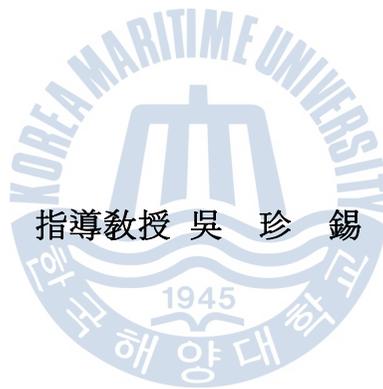
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

방파제 부착형 파력발전시스템의 유입구  
형상에 따른 출력특성 연구

A Study on Output Characteristics of Wave Energy Conversion  
System combined with Breakwater depending on Geometry of  
Seawater Entrance Section



指導教授 吳 珍 錫

2012年 8月

韓國海洋大學校 大學院

메카트로닉스공학과

韓 成 勳

本 論 文 을 韓 成 勳 의 工 學 碩 士  
學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長    工 學 博 士    蘇   明   玉



委   員    工 學 博 士    柳   熙   漢



委   員    工 學 博 士    吳   珍   錫



2012 年 6 月 20 日

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

# 목 차

Nomenclatures .....	iii
List of tables .....	vi
List of figures .....	vii
Abstract .....	x
<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 연구 동향 .....	2
1.3 연구 내용 및 구성 .....	3
<b>제 2 장 파력발전시스템</b> .....	<b>4</b>
2.1 파랑에너지 .....	4
2.1.1 파랑의 특성 .....	4
2.1.2 수심에 따른 파랑의 분류 .....	5
2.2 방파제 부착형 파력발전시스템 구성 .....	8
2.2.1 진동수주 챔버 .....	9
2.2.2 공기터빈 .....	10
2.2.3 횡류터빈 .....	11
2.2.4 해수유입구 형상 .....	12
<b>제 3 장 시뮬레이션</b> .....	<b>13</b>
3.1 개요 .....	13
3.2 수학적 모델링 .....	14
3.3 프로그램 구성 .....	18
3.4 시뮬레이션 결과 .....	20
<b>제 4 장 방파제 부착형 파력발전 모형실험</b> .....	<b>22</b>
4.1 실험조건 .....	22
4.2 모형실험 장치 .....	23
4.2.1 조파수조 .....	23
4.2.2 방파제 부착형 파력발전 모형 .....	23
4.2.3 데이터수집 장치 .....	27

4.3 데이터분석 프로그램 .....	33
<b>제 5 장 실험 및 고찰</b> .....	42
5.1 웰즈터빈과 횡류터빈의 회전속도 .....	42
5.2 발전기 출력 전압 .....	46
5.3 진동수주 내부 수위변화 .....	50
5.4 웰즈터빈 입구의 공기 속도 .....	53
5.5 진동수주 내부 자유수면의 속도 .....	56
<b>제 6 장 결 론</b> .....	59
<b>참 고 문 헌</b> .....	60



## Nomenclatures

$A$	: Cross sectional area of OWC chamber
$a$	: Horizontal distance of elliptic curve at water entrance section of wave energy conversion system
$b$	: Vertical distance of elliptic curve at water entrance section of wave energy conversion system
$c$	: Phase velocity
$d$	: Width of the crest
$E$	: Total energy
$E_K$	: Kinetic energy
$E_P$	: Potential energy
$e$	: Ellipticity
$f$	: Width of water entrance section in front of cross-flow water turbine
$g$	: Acceleration of gravity
$H$	: Wave height
$H_O$	: Incident wave height
$H_I$	: Wave height in the OWC chamber without entrance loss
$H_L$	: Head loss
$H_R$	: Wave height in the OWC chamber without entrance loss
$h$	: Depth of water
$i$	: Height of water entrance section in front of cross-flow water turbine
$K$	: Entrance loss coefficient

$k$	: Wave number
$P_C$	: Output of cross-flow water turbine
$P_W$	: Output of wells turbine
$p_D$	: Dynamic air pressure under the wells turbine
$p_S$	: Static air pressure measured by pitot tube under the wells turbine
$p_T$	: Total air pressure measured by pitot tube under the wells turbine
$Q_R$	: Water flow with entrance loss
$T$	: Wave period
$t$	: Time
$u$	: Horizontal velocity of water particles
$V$	: Velocity of flow in pipe
$V_A$	: Velocity of air flow under the wells turbine
$w$	: Vertical velocity of water particles
$x$	: Horizontal axis
$z$	: Vertical axis
$\delta$	: Proportional factor
$\zeta_I$	: Vertical displacement of free-water surface in the OWC chamber without entrance loss
$\zeta_R$	: Vertical displacement of free-water surface in the OWC chamber with entrance loss
$\eta_c$	: Power factor of cross-flow water turbine
$\eta_w$	: Power factor of wells turbine
$\theta$	: Entrance angle

- $\lambda$  : Wave length
- $\xi_I$  : Velocity of free-water surface in the OWC chamber  
without entrance loss
- $\xi_R$  : Velocity of free-water surface in the OWC chamber  
with entrance loss
- $\rho$  : Density
- $\omega$  : Angular frequency



## List of tables

Table 3.1	Experimental conditions for simulation .....	17
Table 3.2	Dimensionless number by simulation .....	20
Table 4.1	Experimental conditions .....	22
Table 4.2	Design value of water entrance section .....	25
Table 4.3	List of acquisition data .....	29
Table 4.4	Specification of data acquisition device and sensors .....	32
Table 4.5	Description of State .....	36
Table 5.1	RPM by both wells turbine and cross-flow water turbine between 20sec and 50sec .....	45
Table 5.2	Output voltage from DC generator by both wells turbine and cross-flow water turbine between 20sec and 50sec .....	48
Table 5.3	Dimensionless number of both mean RPM and output voltage from DC generator by cross-flow water turbine .....	49
Table 5.4	Vertical displacement of free-water surface and mean wave height in the OWC chamber .....	51
Table 5.5	Air velocity under wells turbine when free-water surface is ascending/descending in OWC chamber .....	54
Table 5.6	Velocity of free-water surface in the OWC chamber .....	56

## List of figures

Fig. 2.1	Wave anatomy and particle motion in deep water .....	4
Fig. 2.2	Properties of wave under various depth conditions .....	5
Fig. 2.3	Space structure of wave .....	7
Fig. 2.4	Wave energy conversion system combined with breakwater .....	8
Fig. 2.5	OWC chamber including wells turbine assembly .....	9
Fig. 2.6	Wells turbine .....	10
Fig. 2.7	Diagram of cross-flow water turbine .....	11
Fig. 2.8	Entrance loss coefficient depending on geometry .....	12
Fig. 3.1	Wave height in the OWC chamber of wave energy conversion system combined with breakwater .....	14
Fig. 3.2	Vertical displacement and velocity of free-water surface in the OWC chamber .....	15
Fig. 3.3	Block diagram of simulation program .....	18
Fig. 3.4	Monitoring system for simulation program using LabVIEW .....	19
Fig. 3.5	Comparison of dimensionless numbers using simulation results .....	21
Fig. 4.1	Experimental setup .....	23
Fig. 4.2	Scale model of wave Energy conversion system .....	24
Fig. 4.3	Side & front view of water entrance section .....	25
Fig. 4.4	Water entrance section for scale model test .....	25
Fig. 4.5	Water entrance section and front wall of scale model .....	26
Fig. 4.6	Cross-flow water turbine of scale model .....	26
Fig. 4.7	Data acquisition system .....	27
Fig. 4.8	Data acquisition system for scale model test .....	28
Fig. 4.9	Cross-flow water turbine assembly .....	30
Fig. 4.10	Wells turbine assembly .....	31
Fig. 4.11	Ultrasonic level sensor in the OWC chamber .....	32
Fig. 4.12	Block diagram of data analysis program .....	33
Fig. 4.13	Monitoring system for data analysis program using LabVIEW .....	35
Fig. 4.14	Measurement of air pressure .....	37
Fig. 4.15	Measurement method of wave height .....	38

Fig. 4.16 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: initialization (state 1) .....	38
Fig. 4.17 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: read (state 2) .....	39
Fig. 4.18 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: filter (state 3) .....	39
Fig. 4.19 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: calculation (state 4) .....	40
Fig. 4.20 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: monitor (state 5) .....	40
Fig. 4.21 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: analysis (state 6) .....	41
Fig. 4.22 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: save (state 7) .....	41
Fig. 5.1 Comparison of phase-shifted PRM by wells turbine versus time .....	42
Fig. 5.2 Comparison for mean RPM by wells turbine .....	43
Fig. 5.3 Comparison of phase-shifted PRM by cross-flow turbine versus time .....	44
Fig. 5.4 Comparison for mean RPM by cross-flow water turbine .....	44
Fig. 5.5 Comparison of phase-shifted output voltage from DC generator by wells turbine versus time .....	46
Fig. 5.6 Comparison of phase-shifted output voltage from DC generator by cross-flow water turbine versus time .....	46
Fig. 5.7 Comparison for mean output voltage by both wells turbine and cross-flow water turbine .....	47
Fig. 5.8 Comparison of dimensionless number for mean output voltage by both wells turbine and cross-flow water turbine .....	48
Fig. 5.9 Comparison of phase-shifted vertical displacement for free-water surface in OWC chamber versus time .....	50
Fig. 5.10 Comparison of mean wave height in the OWC chamber .....	51
Fig. 5.11 Comparison of dimensionless number for mean wave height in the OWC chamber .....	52
Fig. 5.12 Comparison of phase-shifted air velocity under the wells turbine versus time .....	53

Fig. 5.13 Comparison of mean air velocity under the wells turbine when free-water surface is ascending and descending in the OWC chamber ..... 54

Fig. 5.14 Comparison of dimensionless number for mean air velocity under the wells turbine when free-water surface is ascending and descending in the OWC chamber ..... 55

Fig. 5.15 Comparison of phase-shifted free-water surface velocity in the OWC chamber ..... 56

Fig. 5.16 Comparison of mean free-water surface velocity in the OWC chamber ..... 57

Fig. 5.17 Comparison of dimensionless number for mean velocity of free-water surface in the OWC chamber ..... 57



# A study on Output Characteristics of Wave Energy Conversion System combined with Breakwater depending on Geometry of Seawater Entrance Section

Sung-Hun, Han

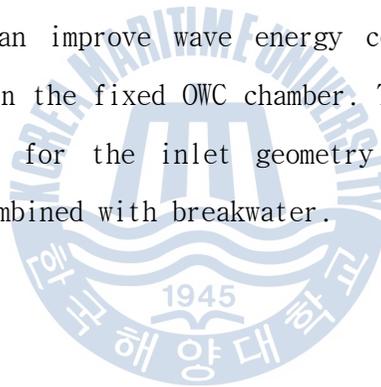
*Department of Mechatronics Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University*

## Abstract

This paper deals with the characteristics of wave energy conversion system combined with breakwater including an air-driven wells turbine and cross-flow water turbine. The wave energy converter with Oscillating Water Column (OWC) has mostly been studied to raise energy conversion efficiency. The aim of this research is to verify the effectiveness of curved seawater entrance section of OWC chamber through both numerical simulation using LabVIEW and scale model experiment in the 2-D wave tank.

Incident wave was assumed as sinusoidal, and other minor losses except for entrance loss were ignored, and also cavity resonance wasn't considered in the simulation. The simulation was conducted at 2.0 sec in wave period and 0.13m in wave height. And 5 different entrance loss coefficients were used as parameters: 0.01, 0.02, 0.1, 0.5. The simulation result which contains the velocity of free-water surface, the vertical displacement of water and the available energy to the turbine shows that the effect of entrance loss coefficient is not significant under the assumptions as mentioned above.

Scale model with 4 different types of entrance section was used in the experiment. The model contains a cross-flow water turbine and a wells turbine. Experimental conditions were almost same as numerical simulation at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height, 0.7m in depth of water. Turbine RPM, output voltage from DC generator, water level in the OWC chamber and air pressure under the wells turbine were measured by CompactRIO system based on LabVIEW. The most obvious difference found in the experimental results depending on the geometry was a hydrodynamic performance from cross-flow water turbine: it was about 25%. Through the model experiment, it can be inferred that an elliptic curved surface whose horizontal distance is longer than vertical distance can improve wave energy conversion efficiency by reducing head loss in the fixed OWC chamber. The experimental results provide a blueprint for the inlet geometry design of wave energy conversion system combined with breakwater.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

산업화 이후, 에너지 수요량은 OECD에 속하는 미국, 일본, 서유럽을 중심으로 꾸준히 증가해왔으며, 각 국의 정부는 발전설비를 확장하여 왔다. 그러나 화석연료를 이용한 발전이 전력 생산에서 많은 비중을 차지하고 있었기 때문에, 연소생성물로 발생하는 탄소에 의한 지구온난화가 가속되어 왔다. 특히 최근 개발도상국의 화력발전 규모가 커지면서부터 온실가스 배출량은 급격히 증가하고 있다. 이는 지구온난화의 주요 원인으로써, 이상기후를 발생시켜 세계 곳곳에 피해를 주고 있다. 이에 대응하여 세계 각 국은 에너지수요를 충족시키고 탄소배출량 줄이기 위하여 신재생에너지 개발에 박차를 가하고 있다 [1-3].

신재생에너지 가운데 해양에너지는 태양광발전과 풍력발전에 비하여 에너지밀도가 높고, 부존율이 크기 때문에 전세계의 주목을 받고 있으며, 특히 파력에너지는 부존율이 약 2TW로 추정되고 있다. 파력에너지는 기계적 에너지로 변환할 때 파의 위치 및 운동에너지를 직접 이용하는가 혹은 다른 형태로의 변환을 거치는가에 따라 가동물체형, 월파/월류형, 진동수주형(Oscillating Water Column, OWC)으로 분류되며, 방파제와 결합된 파력발전 시스템에는 일반적으로 진동수주형이 적용되어 왔다 [4-5].

그러나 이 시스템은 초기 투자비용에 비하여 발전단가가 높고, 해양기상 환경의 영향을 받아서 출력변동이 큰 단점이 있기 때문에, 에너지변환효율을 상승시키고, 출력을 안정화시킬 수 있는 기술이 요구된다. 특히 진동수주형 파력발전시스템은 챔버 내부의 해수 유입유량이 출력에 미치는 영향이 크기 때문에, 유입손실을 줄이기 위한 해수유입구형상에 관한 연구가 필요하다 [4-5].

## 1.2 연구 동향

방과제 부착형 과력발전시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구는 대부분 해수유입구 및 터빈 입/출구 구조설계에 초점을 맞추고 있으며, 시뮬레이션 및 모형실험을 통하여 방과제 전면의 벽면 형상, 횡류터빈 입/출구 노즐형상, 가이드노즐의 각도가 과력발전 출력에 끼치는 영향에 관한 연구 등이 수행되었다.

방과제 전면의 벽면 형상에 관한 연구는 벽면의 형상, 깊이, 두께에 따른 에너지변환효율 차이를 다루고 있다. 특히 방과제 전면 벽면의 물에 잠긴 부분이 둥근 형상일 때 효율이 증가하며, 공진주파수는 방과제 전면의 입구 깊이에 의존한다는 점이 밝혀졌다. 또한 방과제 전면이 곡면으로 설계된 형상은 공진주기 영역을 확장시키고, 에너지변환효율을 증가시킨다는 것이 모형실험을 통하여 증명되었다. 횡류터빈 입출구 노즐형상에 관한 연구는 시뮬레이션과 모형실험을 통하여 4종류의 비대칭 노즐형상 폭과 곡면에 따른 횡류터빈의 성능 비교에 관한 내용을 다루고 있으며, 실험을 통하여 해수유입구 폭이 넓고, 곡면이 큰 경우 에너지변환효율이 상대적으로 높게 나타나는 것이 확인되었다. 가이드노즐에 관한 연구는 횡류터빈에 적합한 해수유입구 각도에 관한 내용을 다루고 있으며,  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  와 같이 4종류의 각도를 적용한 시뮬레이션을 수행하여, 가이드노즐각도가 상대적으로 낮은  $15^\circ$  에서 상대적으로 성능이 높게 나타난다는 결론을 얻었다[6-11].

이외에도 해수출입 시 난류발생을 줄이기 위한 진동수주 챔버 경사각에 관한 연구, 횡파에 의한 성능감소를 방지하기 위한 챔버 구획 설정에 관한 연구, 다단터빈 적용에 의한 효율 향상, 비상 정지용 밸브에 의한 공기유량 조절 및 가변 피치 가이드 베인 조절에 관한 연구 등이 수행되었으며, 영국의 Islay 섬에 설치된 실증플랜트 LIMPET 500(Land Installed Marine Pneumatic Energy Transformer - 500 kW)을 통하여 효과가 검증되었다 [12].

### 1.3 연구 내용 및 구성

본 논문은 웰즈터빈과 횡류터빈이 설치되어 있는 방과제 부착형 파력발전 시스템을 대상으로 한다. 본 논문에 제시된 방과제 부착형 파력발전시스템은 해수유입구가 타원곡면으로 이루어져 있고, 웰즈터빈과 함께 횡류터빈도 설치되어 있다는 점에서 이전의 연구와 차이점이 있다. 연구의 초점은 해수유입구형상에 따른 파력발전시스템의 출력 특성을 파악하는데 있으며, 이를 확인하기 위하여 파고와 파주기가 일정한 조건에서 유입손실계수에 따른 파력발전 시뮬레이션과 해수유입구형상에 따른 모형실험이 각각 수행되었다.

본 논문은 6장으로 구성되어 있으며, 각 장의 내용은 다음과 같다.

제 1 장에서는 연구 배경에 대하여 설명하고, 연구 동향을 간략하게 기술한다.

제 2 장에서는 파랑의 특성과 방과제 부착형 파력발전시스템에 대하여 설명한다.

제 3 장에서는 LabVIEW를 이용한 시뮬레이션을 통하여, 유입손실계수에 따른 진동수주 내부 파고와 자유수면의 속도, 터빈에서 이용 가능한 에너지를 비교한다.

제 4 장에서는 방과제 부착형 파력발전시스템의 축소모형과 데이터수집장치 및 조파수조 실험장치에 대하여 설명한다.

제 5 장에서는 해수유입구형상에 따른 진동수주 내부 파고와 터빈의 출력 차이 및 유속을 비교한다.

제 6 장에서는 실험결과를 토대로 방과제 부착형 파력발전시스템의 성능을 향상시키기 위한 제안과 향후 해결할 과제에 관하여 서술한다.

## 제 2 장 파력발전시스템

### 2.1 파랑에너지

#### 2.1.1 파랑의 특성

파고(Wave height,  $H$ )는 파의 골(Trough)에서 마루(Crest)까지의 높이를 의미한다. 파장(Wave length,  $\lambda$ )은 주기적으로 보이는 파동을 관찰했을 때 마루와 마루 사이의 거리, 혹은 골과 골 사이의 거리이다. 파주기(Wave period,  $T$ )는 어떤 파도의 마루(또는 골)에서 다음 파도의 마루(또는 골)까지 시간을 의미한다. Figure 2.1은 심층수(Deep water)에서 파고, 파장, 파주기 및 파랑의 움직임을 나타낸 것이다. 여기서  $h$ 는 수심을 의미하며, SWL(Still Water Level)은 움직이지 않는 정수면을 나타낸다 [13-15].

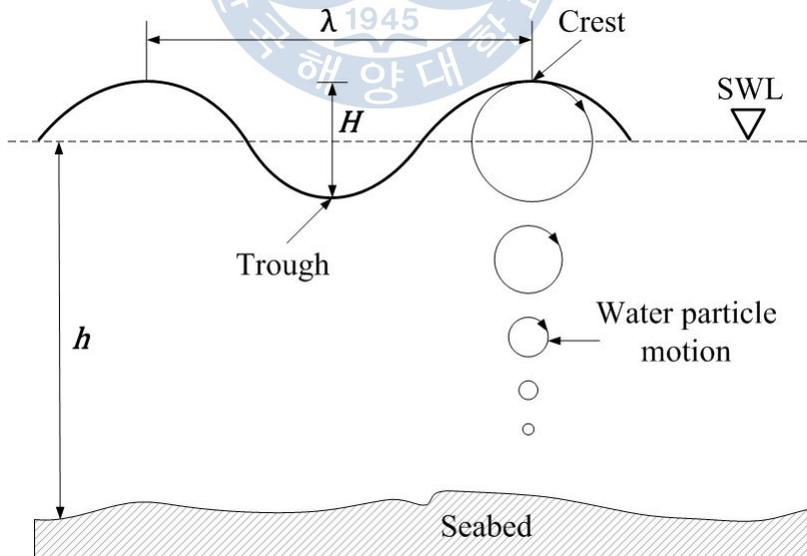


Fig. 2.1 Wave anatomy and particle motion in deep water

## 2.1.2 수심에 따른 파랑의 분류

파랑은 수심  $h$ 에 따라서 물입자의 움직임이 달라지며, 위상속도(Phase velocity,  $c$  [m/s])와 파장  $\lambda$ 은 해안선에 접근할수록 현저히 감소한다. 위상속도  $c$ 는 식(2.1)과 같이 표현될 수 있다.

$$c = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \quad (2.1)$$

$g$ 는 중력가속도를 나타낸다. 식(2.2)는 파수(Wave number,  $k$ )를 나타낸다. Figure 2.2는 수심에 따른 물입자의 움직임을 보여주며, 수심에 따른 파의 파장과 위상속도는 식(2.3) ~ 식(2.9)와 같다. Figure 2.2의  $x$ 와  $z$ 는 평균해수면을 기준으로 하였을 때, 각각 수평방향 및 수직방향의 성분을 나타낸다. 이론적으로 파의 위상속도와 파장은 수심이 0에 가까워질 때 0이 된다.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.2)$$

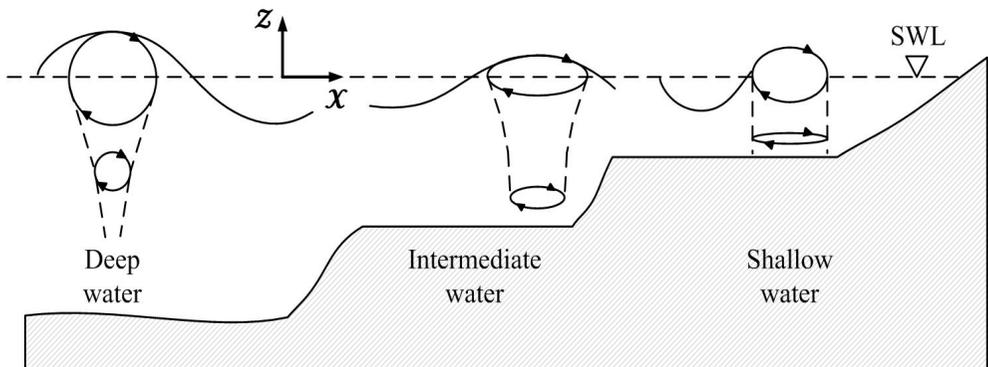


Fig. 2.2 Properties of wave under various depth conditions

$$\text{(Deep water)} \quad \frac{h}{\lambda} \geq \frac{1}{2} \quad (2.3)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.4)$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.5)$$

$$\text{(Intermediate water)} \quad \frac{1}{20} \leq \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2} \quad (2.6)$$

$$\text{(Shallow water)} \quad \frac{h}{\lambda} \leq \frac{1}{20} \quad (2.7)$$

$$\lambda = \sqrt{gh} T \quad (2.8)$$

$$c = \sqrt{gh} \quad (2.9)$$

심층수(Deep water)는 식(2.3)과 같이 수심을 파장으로 나눈 값이 1/2 보다 큰 경우에 해당하며, 파랑이 해저의 형상에 의한 영향을 받지 않기 때문에 물 입자 움직임은 원에 가깝다. 물 입자 움직임은 정수면 SWL 아래로 내려갈수록 기하급수적으로 작아진다. 식(2.4)와 식(2.5)는 각각 심층수에서 파장 및 위상속도를 나타낸다.

중간층수(Intermediate water)는 식(2.6)과 같이 수심을 파장으로 나눈 값이 1/20 보다 크거나 같고, 1/2 보다 작은 경우에 해당한다. 물 입자 움직임은 수평방향 성분이 긴 타원형에 가깝다.

천해(Shallow water)에서는 파랑이 해저에 의한 저항을 받기 때문에, 물 입자의 움직임이 타원에 가깝고, 해안선에 다다를 경우 파장이 짧아지며, 파고가 높아져서 쇄파(Wave breaking)현상이 일어난다. 천해에서 파랑의 움직임은 수평방향 속도  $u$  와 수직방향 속도  $w$  로 분리하여 각각 식(2.10)과 식(2.11)로 나타낼 수 있다.

$$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - \omega t) \quad (2.10)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{(z+h)}{h} \sin(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

$\omega$ 는 각속도,  $t$ 는 시간을 의미한다. 파랑의 위상속도는 심층에서 가장 빠르고 천해에서 가장 느린 반면, 파고는 쇄파현상으로 인하여 천해에서 가장 높고 중간층수에서 가장 낮게 나타난다.

한편, 파랑이 가진 총에너지  $E$ 는 식(2.12)와 같이 위치에너지  $E_P$ 와 운동에너지  $E_K$ 의 합으로 나타낼 수 있다.

$$E = E_P + E_K = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda d \quad (2.12)$$

$\rho$ 는 유체 밀도,  $d$ 는 파랑의 너비를 의미하며, 식(2.12)을 이용하여 한 주기의 파랑이 가지는 에너지량을 계산하는데 사용된다 [16]. Figure 2.3은 파랑의 너비를 나타낸 것이다.

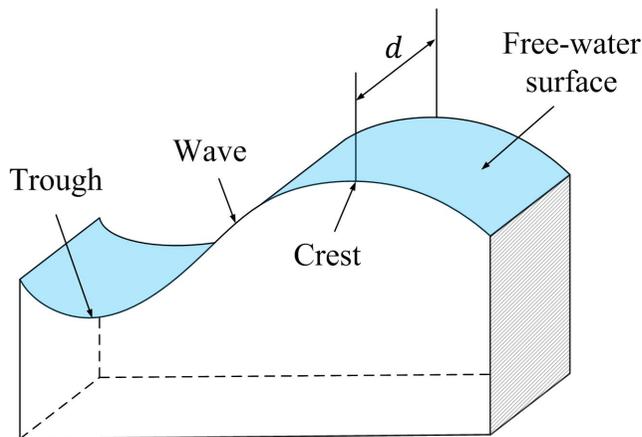


Fig. 2.3 Space structure of wave

## 2.2 방파제 부착형 파력발전시스템 구성

방파제 부착형 파력발전시스템은 외해로부터의 파랑을 막아서 내항을 보호하는 방파제 기능과 파력에너지를로부터 전력을 생산하는 발전 기능이 결합된 형태이다. 방파제 부착형 파력발전시스템은 직립형 또는 경사각이 있는 형태로 설계되며, 내부에 진동수주 챔버를 설치하는 것이 일반적이다. Figure 2.4는 본 논문에 제시된 방파제 부착형 파력발전시스템을 나타낸 것이다. 방파제 앞쪽 벽면은 기울기가 없는 직립형으로 되어 있으며, 측면에서 바라볼 때 직사각형 형상이다. 파력발전시스템은 진동수주 챔버, 웰즈터빈, 횡류터빈, 해수 유입구로 구성되어 있다.

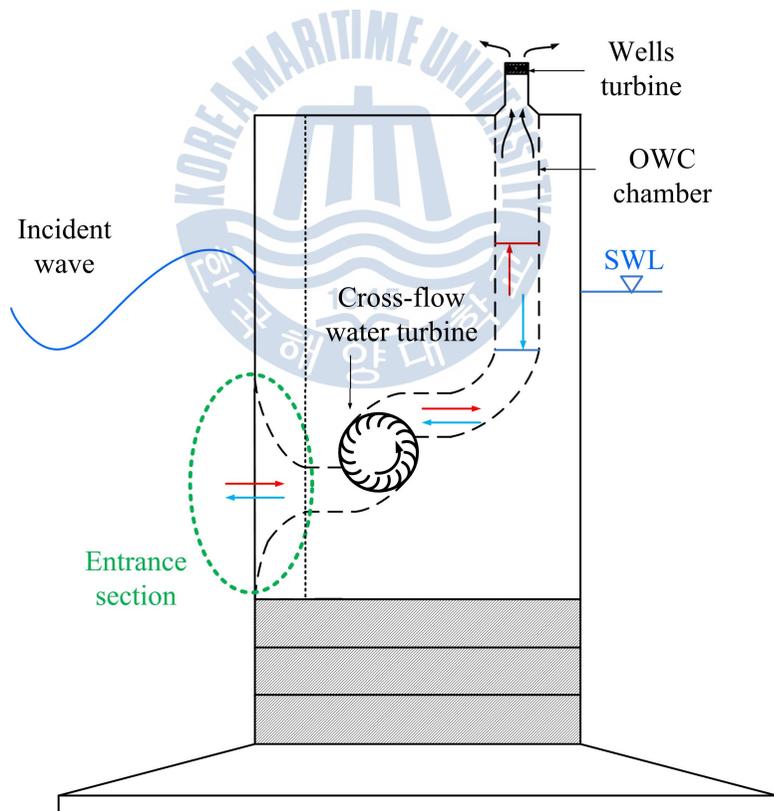


Fig. 2.4 Wave energy conversion system combined with breakwater

## 2.2.1 진동수주 챔버

진동수주는 주기적으로 상하 왕복운동을 하는 파랑의 움직임을 의미하며, 이 수위변화는 진동수주 내부 공기압력을 변화시킨다. 즉 수위가 상승할 때 진동수주 내부 공기압력이 증가하며, 반대로 수위가 하강하면 공기압력이 감소한다. 그런데 진동수주 챔버의 상부는 대기에 노출되어 있으므로, 수위의 변화에 따라 진동수주 내부로 공기가 유입되거나 유출된다. 진동수주 내부에는 공기와 물의 왕복류가 존재하므로, 각각 공기터빈과 횡류터빈을 이용하여 에너지를 변환할 수 있다 [6]. 본 논문에 제시된 방과제 부착형 파력발전시스템의 진동수주 챔버는 방과제 내부에 위치하고 있으며, 내부 단면은 직사각형으로 되어 있다. 또한 진동수주 상부에는 공기의 왕복류를 이용하여 회전하는 웰즈터빈이 위치하고 있다. Figure 2.5는 웰즈터빈이 설치된 진동수주 챔버의 구조를 나타낸 것이다.

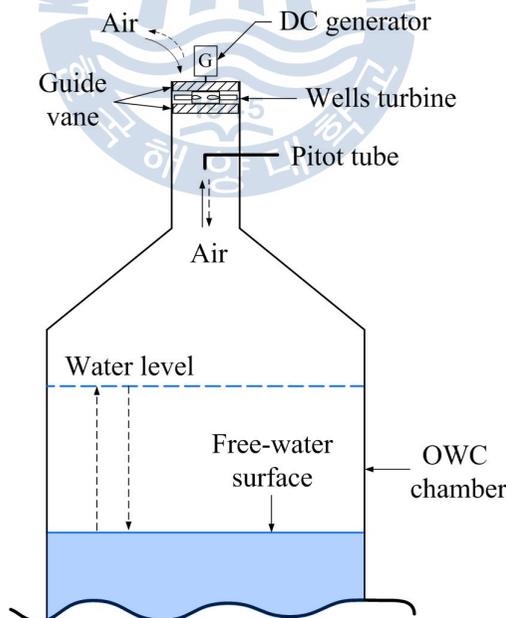


Fig. 2.5 OWC chamber including wells turbine assembly

## 2.2.2 공기터빈

공기터빈은 진동수주 상부에 설치되며, 각 장치가 해수에 직접 노출되지 않으므로 신뢰성이 높고 유지보수가 용이한 장점이 있기 때문에, 세계적으로 가장 많은 실증플랜트 운용실적을 가지고 있다 [6]. 공기터빈은 주로 웰즈터빈 또는 임펄스터빈(Impulse turbine)이 사용되는데, 이는 공기가 흐르는 방향이 반대로 바뀌어도 한 방향으로만 회전하는 특성이 있다. 임펄스터빈은 웰즈터빈에 비하여 기동토크가 낮고, 비교적 낮은 회전속도에서도 출력특성이 양호하나, 특정 회전속도 이상에서는 웰즈터빈의 출력이 상대적으로 높게 나타난다. 이러한 특성 때문에 현재 대부분의 방과제 부착형 파력발전시스템에는 웰즈터빈이 설치되어 운용되고 있다. Figure 2.6은 웰즈터빈 구조를 보여준다.

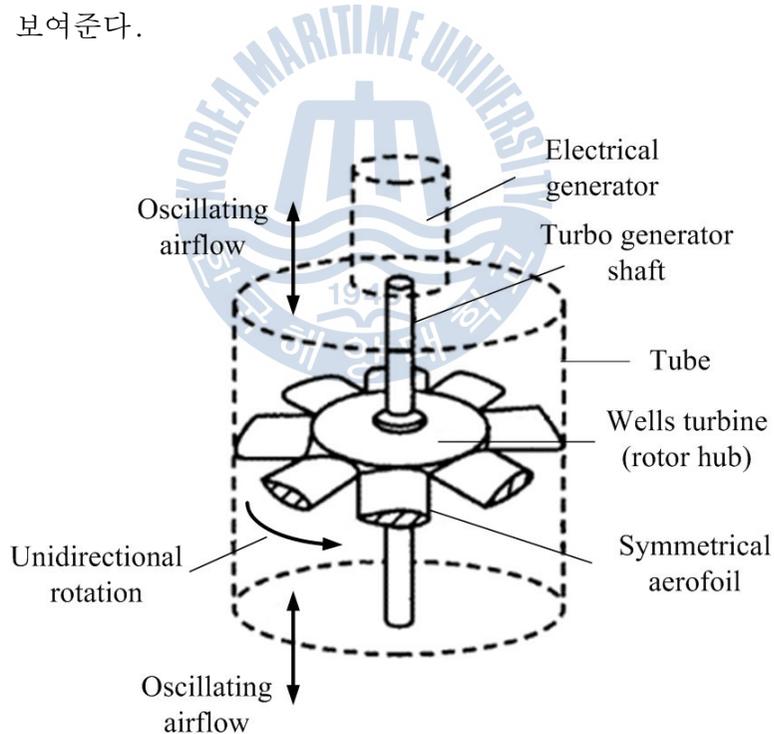


Fig. 2.6 Wells turbine

### 2.2.3 횡류터빈

횡류터빈은 물이 런너(Runner)를 통과할 때 발생하는 동력에 의하여 회전한다. 즉, 터빈의 블레이드로 물이 유입될 때 1차 동력이 발생하며, 터빈의 중간부분에서 블레이드를 지나가는 물의 흐름에 의해서도 동력이 발생한다. 이러한 물의 흐름은 자체 세정기능으로 작용하여 오염에 강한 특징이 있고, 유량변화에 따른 효율변화가 적은 특징이 있다. Figure 2.7은 횡류터빈 형상을 나타낸다. 횡류터빈은 주로 소수력발전에 사용되어왔으며, 과력발전용으로 일부 연구가 수행되었지만 아직 상용화된 사례는 알려진 바가 없다. 과력발전에 적용되는 횡류터빈은 수중에서 해수의 왕복류에 의하여 구동되며, 웰즈터빈과 마찬가지로 유체가 흐르는 방향이 반대로 바뀌어도 회전 방향이 변하지 않는 특징이 있다. 횡류터빈은 터빈 입출구 노즐 형상을 변형하거나 안개깃 각도를 조절하는 등 에너지변환효율을 높이기 위한 연구가 진행되어 왔으며, 공기터빈에 비하여 에너지 변환효율이 상대적으로 높은 것으로 알려져 있다. 그리고 횡류터빈은 과력발전에 적용되는 경우 해수가 흐르는 방향이 주기적으로 바뀌기 때문에, 해수 입출구 노즐형상은 대칭으로 설계하는 것이 성능이 뛰어나다고 보고된 바 있다 [11, 17].

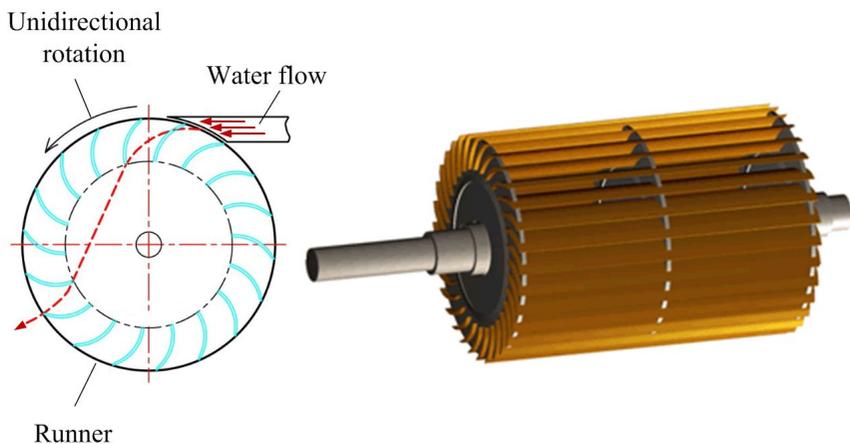


Fig. 2.7 Cross-flow water turbine

## 2.2.4 해수유입구 형상

방과제 앞쪽 벽면 하부에는 해수유입구가 위치하고 있으며, 유입구 형상에 따라 에너지 손실이 달라진다. Figure 2.8은 유입구 형상에 따른 유입손실계수를 나타낸다. 유입손실은 관 단면적이 급격히 축소되는 경우 발생하며, 정상상태에서 유체의 흐름이 급격하게 변할 때 유입손실계수  $K$ 는 식 (2.13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{2gH_L}{V^2} \quad (2.13)$$

여기서,  $H_L$ 은 손실수두,  $V$ 는 관내에 흐르는 유체의 속도를 나타낸다. 유입손실계수는 유입구 형상에 따라 달라지며, 일반적으로 실험결과에 의존하는 경향이 있다. 유입구 곡면이 원형인 경우 유입손실계수는 원의 반경과 유로직경의 비율에 따라 달라지며, 약 0.1~0.2의 범위에 있는 것으로 알려져 있다. 유입구 곡면이 타원일 경우, 유입손실계수의 범위는 0.01~0.05로 알려져 있다 [18].

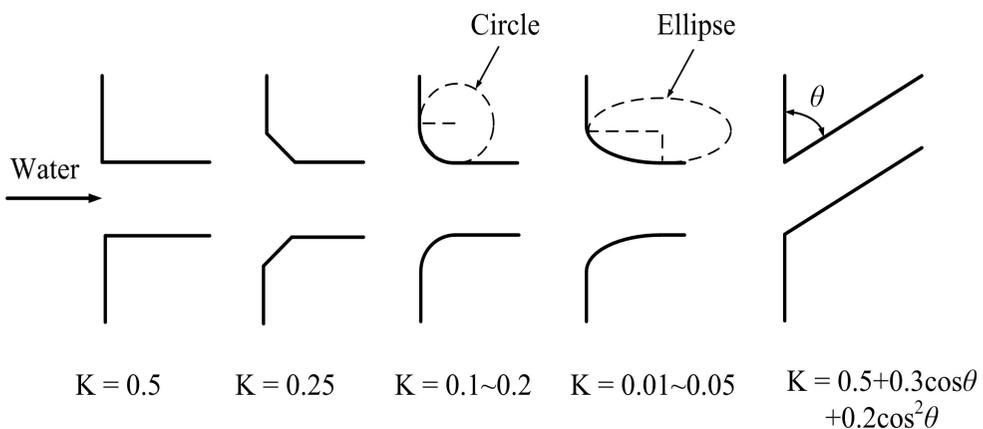


Fig. 2.8 Entrance loss coefficient depending on geometry

## 제 3 장 시뮬레이션

### 3.1 개요

시뮬레이션은 파고 및 주파수가 변할 때, 해수 유입구 측 유입손실계수에 따른 진동수주 내부 파고, 유속 및 터빈의 출력차이가 얼마만큼 발생하는지 확인하는데 목적이 있다. 이를 위하여 LabVIEW를 이용한 시뮬레이션이 수행되었다. 시뮬레이션에서 가정한 항목은 아래와 같다.

- 공진에 의한 효과 무시
- 터빈의 출력계수는 일정
- 유입구 형상에 의한 손실 이외의 손실은 무시
- 진동수주 챔버의 내부 파고는 외부 파고에 비해
- 점성에 의한 효과 무시
- 해수의 흐름은 비회전성
- 해수 및 공기는 비압축성 유체
- 입사파의 파고는 파장에 비하여 매우 작음

### 3.2 수학적 모델링

입사파가 사인파라고 가정할 때, 진동수주 내부 자유수면은 주기적으로 상승 및 하강하게 된다 [16]. 또한 진동수주 내부 파고가 외부 파고에 비례하고 비례상수를  $\delta$ 라 가정하면, 유입손실이 없는 경우 진동수주 내부 파고는 식(3.1)과 같이 나타낼 수 있다. Figure 3.1은 진동수주 챔버의 내부 파고를 나타낸 것이다.

$$H_I = \delta H_O \quad (3.1)$$

$H_I$ 와  $H_O$ 는 각각 진동수주 챔버 내부 파고와 외부 파고를 나타낸다 [19]. Figure 3.2는 진동수주 내부 자유수면의 변위 및 속도를 나타낸 것이다.

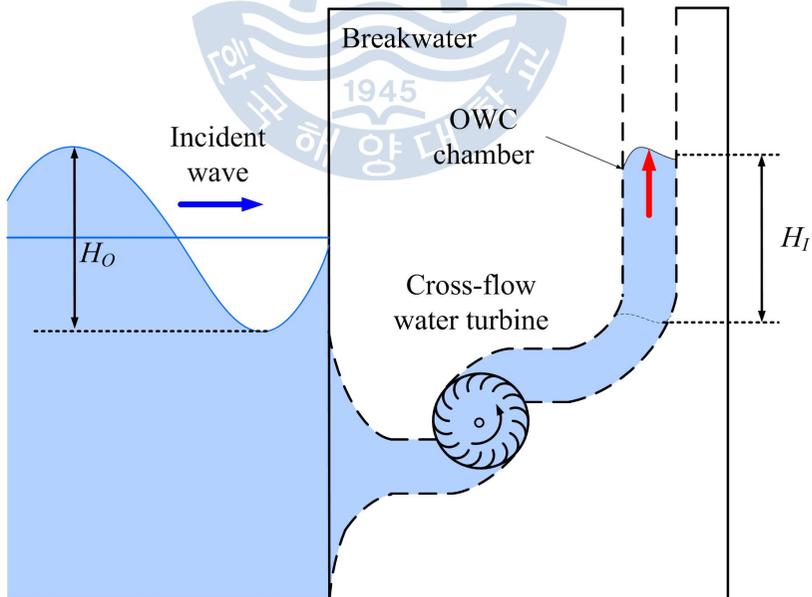


Fig. 3.1 Wave height in the OWC chamber of wave energy conversion system combined with breakwater

진동수주 내부 자유수면의 변위(수직방향)가 평균값을 가진다고 가정할 때, 유입구 형상에 의한 손실이 없는 경우 변위  $\zeta_I$  및 속도  $\xi_I$ 는 각각 식 (3.2)와 식(3.3)으로 나타낼 수 있다.

$$\zeta_I = -\frac{H_I}{2} \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

$$\xi_I = \frac{d\zeta_I}{dt} = \frac{\omega H_I}{2} \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

여기서, 식(3.2)의 음수부호는 진동수주 내부 자유수면이 하강하는 방향을 의미한다 [16].

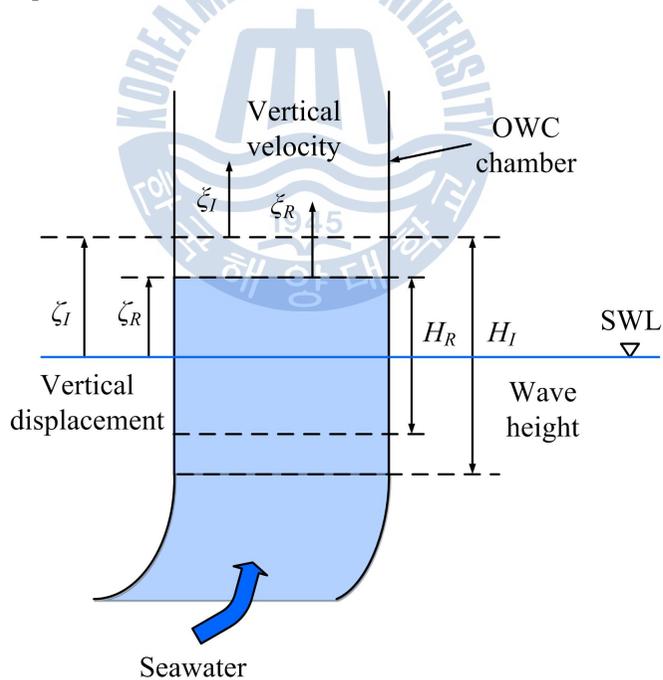


Fig. 3.2 Vertical displacement and velocity of free-water surface in the OWC chamber

한편, 해수유입구형상에 의한 수두손실이 생긴다고 가정할 때, 진동수주 내부 파고  $H_R$  은 손실이 없는 경우의 내부 파고  $H_I$  와 유입손실분  $H_L$  의 차이로 구할 수 있다.  $H_L$  은 식(2.13)을 이용하여 구할 수 있으며, 속도는 진동수주 내부수면이 상승하는 0 ~  $T/2$  시간동안의 평균값을 적용하여 식(3.4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_R &= H_I - H_L \\ &= H_I - \frac{K}{2g} \left\{ \frac{2}{T} \int_0^{T/2} \xi_I dt \right\}^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

유입구 형상에 의한 수두손실이 있을 때, 자유수면의 수직변위  $\zeta_R$  및 속도  $\xi_R$  은 각각 식(3.5)와 식(3.6)으로 나타낼 수 있다 [16].

$$\zeta_R = -\frac{H_R}{2} \cos(\omega t) \quad (3.5)$$

$$\xi_R = \frac{d\zeta_R}{dt} = \frac{\omega H_R}{2} \sin(\omega t) \quad (3.6)$$

상승기간 동안 진동수주 챔버 내부로 흐르는 해수의 유량  $Q_R$  은 연속방정식을 이용하여 챔버의 단면적  $A$  와 자유수면의 수직방향 속도  $\xi_R$  의 곱으로 식(3.7)과 같이 구할 수 있다.

$$Q_R = A\xi_R \quad (3.7)$$

터빈에 의한 에너지 손실을 무시하였을 때, 자유수면이 상승하는 시간동안 횡류터빈과 웰즈터빈의 기계적 출력  $P_C$  와  $P_W$  는 각각 식(3.8)과 식

(3.9)로 나타낼 수 있다.

$$P_C = \rho g Q_R H_R \eta_c \quad (3.8)$$

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A \xi_R^3 \eta_w \quad (3.9)$$

$\eta_c$  과  $\eta_w$  는 각각 횡류터빈과 웰즈터빈의 출력계수를 나타내며, 시뮬레이션에서는 각 출력계수를 일정하다고 가정하였다. 시뮬레이션은 입사파의 파고가 0.13 m이고, 파주기 2 sec에서 수행되었다. 또한 해수의 유로는 429 mm × 155 mm인 직사각형으로 설정하였고, 횡류터빈과 웰즈터빈의 출력계수는 각각 0.4로 가정하였다. 유입손실계수는 Fig. 2.7의 유입구 형상을 참고하여 5 종류로 구분하였으며, Table 3.1과 같다. 본 논문에서는 해수유입구형상이 타원 곡면을 대상으로 하기 때문에, Fig. 2.7에 제시된 것과 같이 유입손실계수는 0.01~0.5 범위에 있을 것으로 예상할 수 있다.

Table 3.1 Experimental conditions for simulation

Parameters	Values
Incident wave height ( $H_O$ )	0.13 m
Proportional factor ( $\delta$ )	1.0
Wave period ( $T$ )	2 sec
Entrance loss coefficient ( $K$ )	0.01, 0.02, 0.1, 0.2, 0.5
Flow area ( $A$ )	0.066495 m <sup>2</sup> (429 mm × 155 mm)
Power factor of cross-flow water turbine ( $\eta_c$ )	0.4
Power factor of wells turbine ( $\eta_w$ )	0.4

### 3.3 프로그램 구성

Figure 3.3과 Fig. 3.4는 각각 데이터분석 프로그램의 구조와 시뮬레이션 프로그램의 모니터링 시스템을 나타낸다. Figure 3.3에서 데이터분석 프로그램은 모니터링 시스템에는 변수를 입력하는 숫자형 컨트롤과 자유수면의 수직방향 속도, 공기터빈과 횡류터빈의 기계적 출력을 나타내는 그래프로 구성되어 있으며, 유입손실계수에 따른 성능 비교를 용이하게 하기 위하여 각 시뮬레이션 결과를 무차원수 그래프도 나타내었다. 입력변수는 입사파의 파고, 주기, 유입손실계수, 유로 단면적, 터빈출력계수, 비례상수가 있다. 식(3.8)과 식(3.9)에서 터빈은 2개 중에서 1개만 작동한다고 가정하여 출력을 계산하였다.

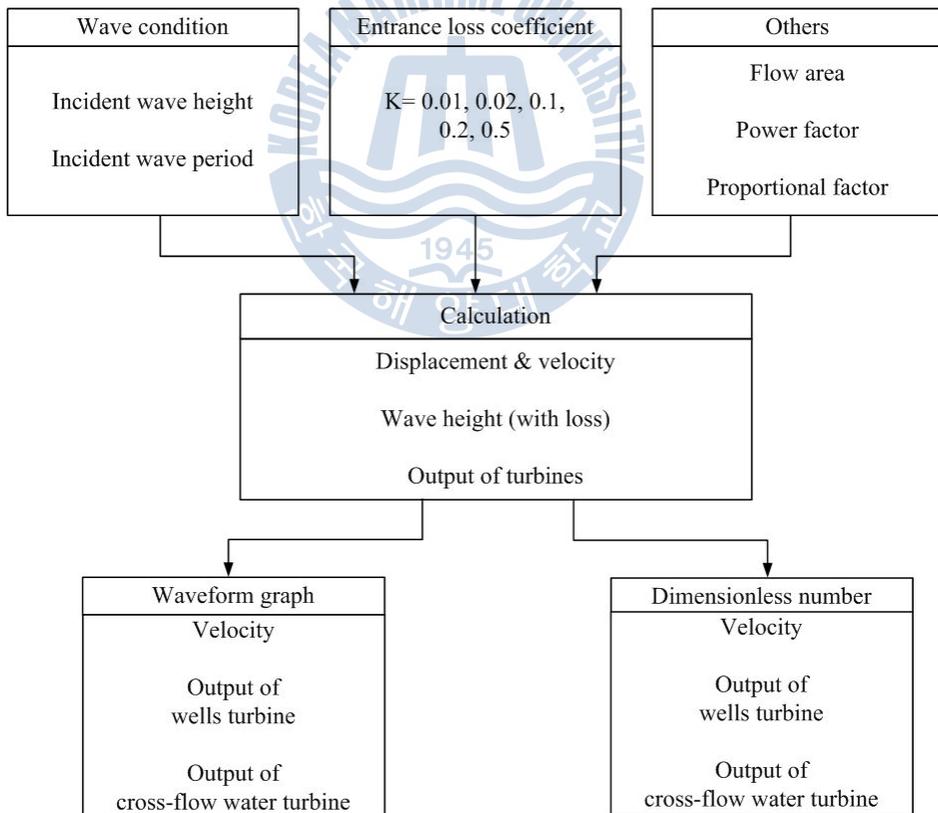


Fig. 3.3 Block diagram of simulation program

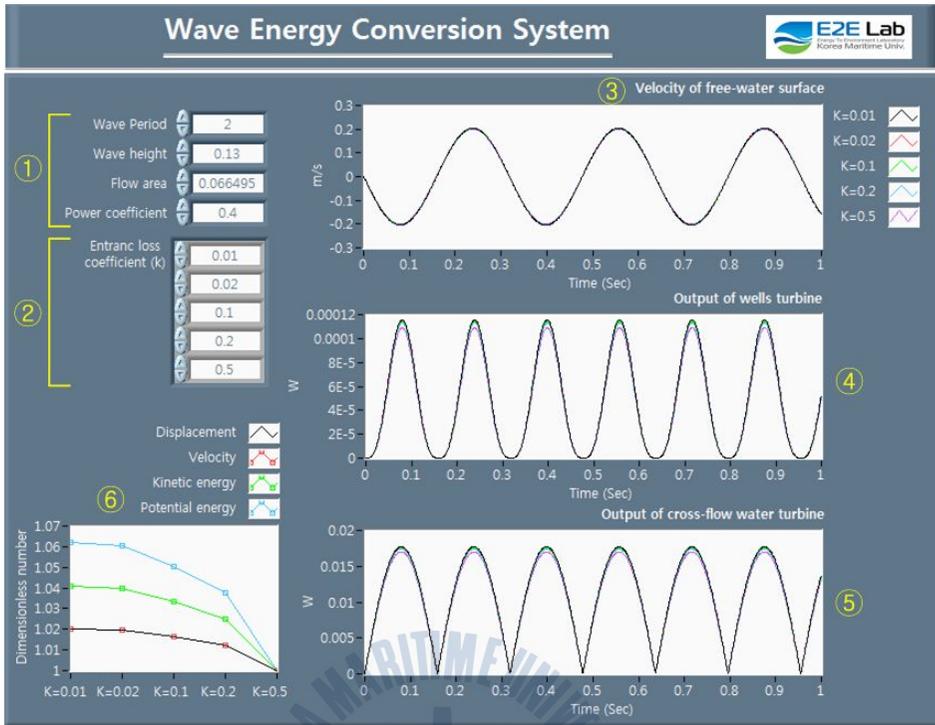


Fig. 3.4 Monitoring system for simulation program using LabVIEW

Figure 3.4에서 ①은 시뮬레이션 환경을 입력할 수 있는 창을 나타낸다. 시뮬레이션 환경 입력 창은 Table 3.1과 같이 파주기, 파고, 유로 단면적, 터빈의 출력계수를 설정할 수 있도록 구성되어 있다. ②는 유입손실계수 입력 창을 나타내며, 유입손실계수는 0~1 범위 내 임의의 숫자 입력이 가능하다. ③은 진동수주 내부 자유수면의 수직방향 속도를 그래프로 나타낸 것이다. 방파제 부착형 파력발전시스템의 유로 단면적은 일정하기 때문에 유속과 유량은 비례한다고 볼 수 있으며, 이는 터빈출력과 직접적으로 관련이 있으므로, 시뮬레이션을 통하여 유속을 확인할 필요가 있다. ④와 ⑤는 각각 식(3.9)와 식(3.8)을 이용하여 웰즈터빈과 횡류터빈 출력을 계산하여 그래프로 나타낸 것이다. ⑥은 시뮬레이션 결과(③~⑤)를 비교하기 용이하도록 무차원수로 나타낸 그래프이다. 무차원수는 0~ $T$ 를 1주기로 볼 때, 0~ $T/2$  기간 동안 각 시뮬레이션 결과(③~⑤)의 평균값이 적용되었다.

### 3.4 시뮬레이션 결과

Table 3.2와 Fig. 3.5는  $K=0.01, 0.02, 0.1, 0.2$ 에 대한 시뮬레이션 결과를  $K=0.5$ 에 대한 비율을 무차원수로 나타낸 것이다. 즉, 무차원수는 5개의 유입손실계수 가운데 유입손실계수가 0.5인 경우 시뮬레이션 결과를 1로 가정하여 각 나머지 유입손실계수의 결과를 상대적인 비율로 나타낸 것이다. 무차원수는 특정 대상 하나를 기준으로 두고, 다른 대상을 비교할 때, 효율 또는 성능을 상대적으로 비교하기 용이하기 때문에 일반적으로 많이 이용되고 있다.

시뮬레이션결과 식(2.13)으로 예상할 수 있듯이 진동수주 내부 자유수면의 속도 및 각 터빈에서의 출력은 유입손실계수  $K$ 에 반비례하여 나타났다.  $K=0.01$ 에서 자유수면의 속도는  $K=0.5$ 에 비하여 각 터빈에서의 출력은 약 4%~6% 높게 나타났다. Figure 3.4의 과형에서도 확인할 수 있듯이 유입손실계수가 출력에 끼치는 영향은 미미하였다. 이는 시뮬레이션에서 주기적으로 변하는 유속을 평균하여 유입손실을 계산하였기 때문으로 판단된다. 또한 시뮬레이션에서는 공진에 의한 영향과 점성에 의한 영향이 고려되지 않은 것도 요인으로 보인다.

Table 3.2 Dimensionless number by simulation: velocity of free water surface; output of cross-flow water turbine; output of wells turbine

Items	$K=0.01$	$K=0.02$	$K=0.1$	$K=0.2$	$K=0.5$
Velocity of free-water surface	1.02019	1.01978	1.01648	1.01236	1
Output of cross-flow water turbine	1.04079	1.03995	1.03324	1.02488	1
Output of wells turbine	1.0618	1.06052	1.05027	1.03754	1

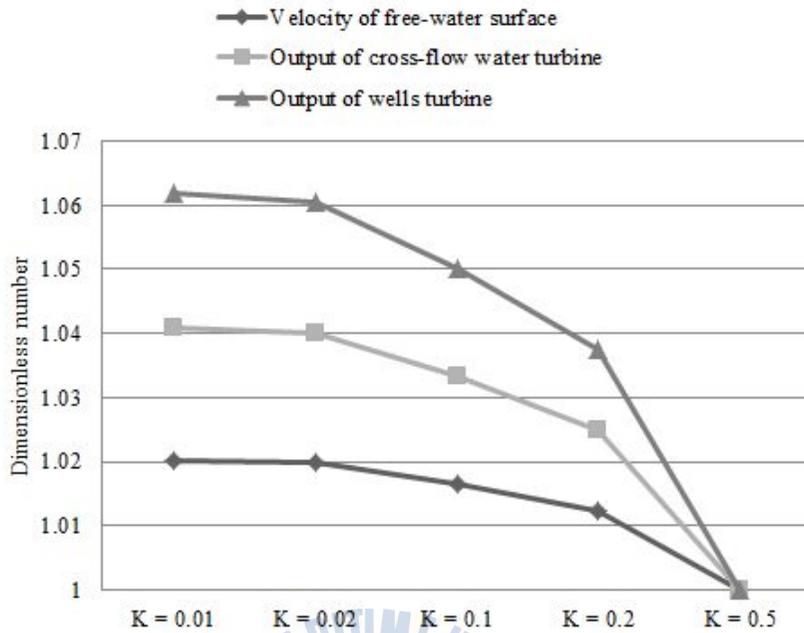
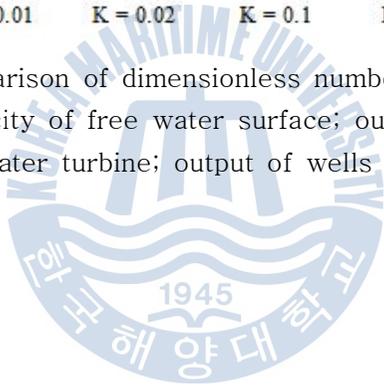


Fig. 3.5 Comparison of dimensionless numbers using simulation results: velocity of free water surface; output of cross-flow water turbine; output of wells turbine



## 제 4 장 방파제 부착형 파력발전 모형실험

### 4.1 실험조건

모형실험은 파고 0.13 m, 파주기 2 sec, 수심 0.7 m 조건 하에 2차원 조파 수조에서 수행되었다. 진동수주 챔버의 단면적은  $0.066495 \text{ m}^2$  ( $429 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$ )인 직사각형으로 되어 있다. 또한 파력발전시스템에는 진동수주 상부와 하부에 각각 웰즈터빈과 횡류터빈이 설치되어 있으며, 터빈 블레이드의 수는 각각 8매, 26매로 되어있다. 물 유입구형상은 4종류(Case A~D)로 구분하여 제작되었으며, 이를 교체하며 실험을 수행하였다. 유입구형상 이외의 실험조건은 모두 동일하게 하였으며, 방파제 부착형 파력발전 모형실험 환경은 Table 4.1에 나타나 있다.

Table 4.1 Experimental conditions

Parameters	Values
Wave height ( $H_0$ )	0.13 m
Wave period ( $T$ )	2 sec
Depth of water ( $h$ )	0.7 m
Curved entrance section	Case A ~ D
Flow area ( $A$ )	$0.066495 \text{ m}^2$ ( $429 \text{ mm} \times 155 \text{ mm}$ )
Number of wells turbine blade	8
Number of cross-flow water turbine blade	26

## 4.2 모형실험 장치

### 4.2.1 조파수조

모형실험에 사용된 수조의 크기는 길이 18m, 높이 1.4m, 폭 1.2m인 2차원 조파수조이다. 수조에 설치된 조파기(Wave maker)는 수심이 달라져도 물 입자의 움직임이 일정한 특징이 있는 천해(Shallow water) 생성에 적합한 피스톤 패들(Piston paddle) 타입이다 [18]. 조파기로부터 방파제 부착형 파력발전 모형의 거리는 약 15m이며, Figure 4.1은 방파제 부착형 파력발전 모형 실험 장치를 보여준다.

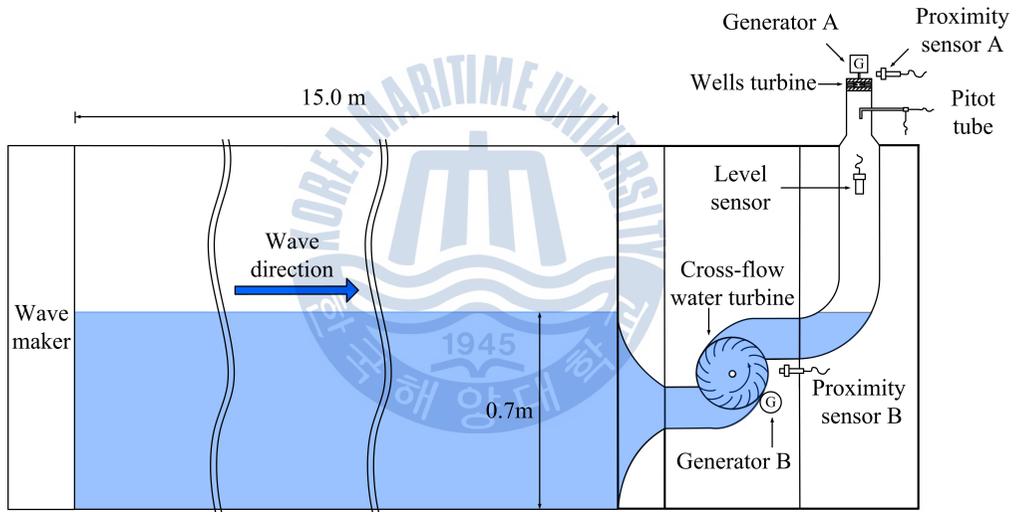


Fig. 4.1 Experimental setup

### 4.2.2 방파제 부착형 파력발전 모형

방파제 부착형 파력발전 모형은 980 mm × 980 mm × 1200 mm의 직육면체이며, 방파제 벽면과 진동수주 챔버는 아크릴을 사용하여 제작되었고, 물 유입구 및 축소관은 스테인리스스틸로 제작되었다. 유입구 부분은 실험이 용이하도록 방파제 부착형 파력발전 모형의 앞쪽벽면과 함께 분리 및 교체가

가능하도록 제작되었다. 방과제 부착형 파력발전 모형은 유입구, 횡류터빈, 웰즈터빈, 진동수주 챔버, 계류장치 등으로 구성되어 있다 [6-11]. Figure 4.2는 방과제 부착형 파력발전 모형을 보여준다.



Fig. 4.2 Scale model of wave Energy conversion system

Figure 4.3과 Fig. 4.4는 각각 유입구형상 부분과 4종류의 유입구를 나타낸 것이며, Table 4.2는 유입구 설계값을 보여준다. 유입구는 상하좌우 모두 곡면으로 설계하였으며, 곡면은 타원방정식  $\left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1\right)$ 을 이용하였다. Figure 4.3에서,  $a$ 와  $b$ 는 유입구 곡면에서 각각  $x$ 축 성분과  $y$ 축 성분의 길이를 의미하며, Fig. 4.5와 같이 상하좌우 4면이 동일하게 유입구 곡면이 적용되었다. 식(4.1)은 타원의 이심률(Eccentricity)을 나타낸 것이며, 이심률이 1에 가까울수록 타원곡면의 수평방향 성분이 수직방향 성분보다 긴 타원에 가깝고, 이심률이 0에 가까울수록 타원곡면은 원에 가깝다. Case A와 Case B는 이심률이 각각 0.884477, 0이다. 유입구는 형상에 따라 길이가 달라지기 때문에 Fig. 4.5와 같이 각각 방과제의 앞쪽 벽면을 따로 제작하였다 [19].

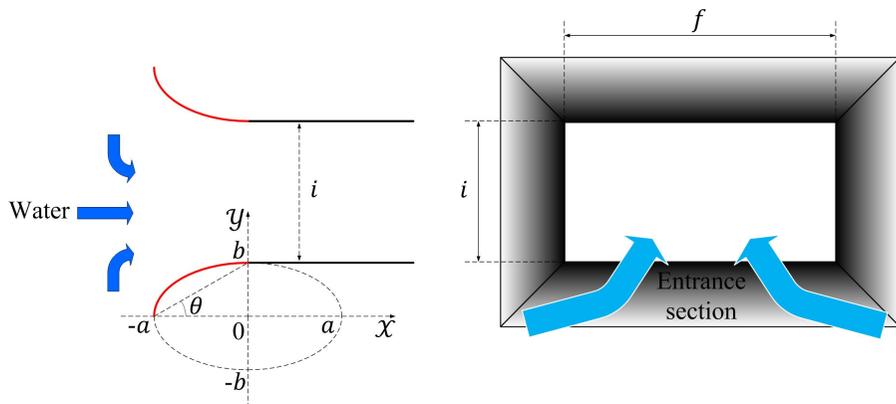


Fig. 4.3 Side & front view of water entrance section

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b^2}{a^2}\right)} \quad (a > b > 0) \quad (4.1)$$

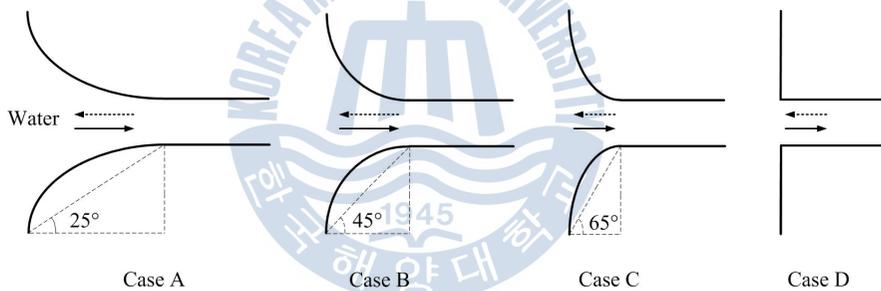


Fig. 4.4 Water entrance section for scale model test

Table 4.2 Design value of water entrance section

Water entrance section	$a$	$b$	$\theta$	$i$	$f$	$a/b$
Case A	332.4 mm	155 mm	25°	155 mm	429 mm	2.14
Case B	155 mm		45°			1
Case C	72.3 mm		65°			0.466
Case D	0 mm		90°			0



Fig. 4.5 Water entrance section and front wall of scale model

횡류터빈의 가로 길이는 449 mm, 외경은 299 mm, 내경은 194 mm, 터빈 입구와 출구 높이는 155 mm이다. 터빈 블레이드는 26 매이며, 축을 기준으로 약 13.8° 각도의 간격으로 배치되었다. 터빈의 축과 블레이드는 각각 스테인리스스틸과 아크릴로 제작되었다 [10]. 웰즈터빈 블레이드는 8 매이며, 웰즈터빈의 상부와 하부에는 각각 안내깃을 설치하여 터빈의 성능이 개선되도록 하였다. Figure 4.6은 방과제 부착형 과력발전 모형 내부에 설치된 횡류터빈을 보여준다.



Fig. 4.6 Cross-flow water turbine of scale model

### 4.2.3 데이터수집 장치

데이터수집 시스템은 데이터수집 장치, 터미널보드, SMPS(Switching Module Power Supply), PC, 랜(LAN)선 등으로 구성되어 있다. Figure 4.7은 데이터수집 시스템의 구성도를 나타낸다.

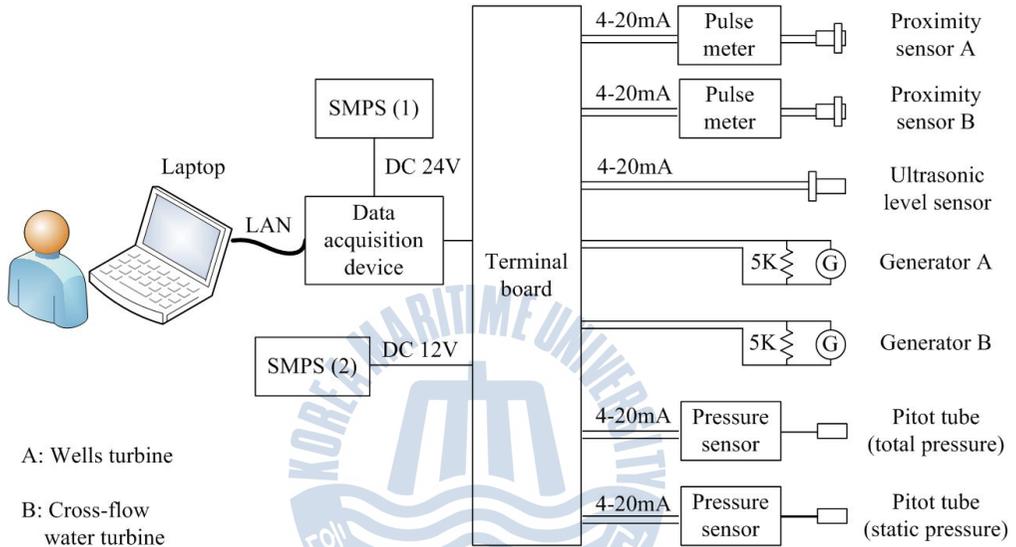


Fig. 4.7 Data acquisition system

데이터수집 장치는 LabVIEW 기반의 데이터수집 및 제어가 가능한 CompactRIO(NI-9022, National instruments) 및 아날로그전압 입력모듈(NI-9205, National Instruments)로 구성되어 있다. CompactRIO는 아날로그전압 입력모듈을 통하여 수집한 데이터를 가공 또는 변환하여 PC에 전송하는 역할을 한다. 아날로그전압 입력모듈은 32개 채널이 있고,  $\pm 200$  mV부터  $\pm 10$  V까지 측정가능하다. 이는 CompactRIO 시스템의 슬롯에 연결되어, 센서로부터의 신호를 수집하는 역할을 한다 [21-22].

터미널 보드는 250  $\Omega$  저항, 디프스위치(Dip switch), 커넥터 등으로 구성되어 있다. 저항은 아날로그전압 입력모듈에서 데이터수집이 가능하도록 4 ~

20 mA 전류신호를 1~5 V 전압신호로 변환하는 역할을 한다. 덤스위치는 센서의 종류가 바뀌거나 단자 위치가 바뀌게 될 경우를 대비하여 선택적으로 전류신호를 전압신호로 변환할 수 있도록 하기 위하여 설치되었다.

SMPS는 2개로 구분되어 있으며, 하나는 CompactRIO에 직류 24 V를 공급하며, 다른 하나는 펄스미터와 초음파센서 및 압력센서에 직류 12 V를 공급한다. PC는 LAN선을 통하여 CompactRIO 시스템에서 전송된 각 센서의 측정값을 LabVIEW를 이용하여 모니터링 할 수 있도록 되어 있으며, 데이터를 스프레드시트로 저장하는 역할을 한다. Figure 4.8은 데이터수집 시스템을 나타낸 것이다.

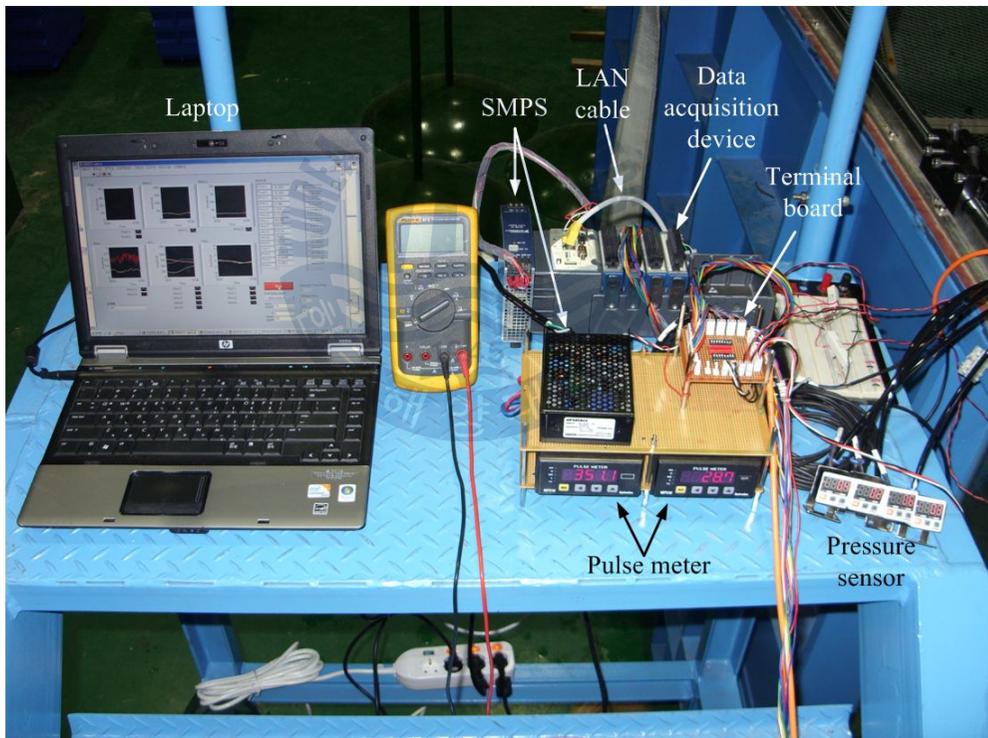


Fig. 4.8 Data acquisition system for scale model test

데이터수집 항목은 웰즈터빈과 횡류터빈의 회전속도, 각 터빈의 발전용 모터에 설치된 저항 양단의 전압, 웰즈터빈 하부의 공기압력(전압 및 정

압), 진동수주 챔버 내부의 수위이다. Table 4.3은 데이터수집 항목 및 설치 위치를 나타낸다.

Table 4.3 List of acquisition data

Items	Sensors or devices	Installation
RPM	Proximity sensor & pulse meter	Wells turbine
		Cross-flow water turbine
Voltage	By measuring voltage from DC generator	Wells turbine
		Cross-flow water turbine
Water level	Ultrasonic level sensor	Inside of OWC chamber
Total pressure	Pressure sensor & pitot tube	Inside of air duct under the wells turbine
Static pressure		

횡류터빈의 회전속도는 근접센서 및 펄스미터를 이용하여 측정하였다. 횡류터빈은 수중에 노출되었기 때문에, 근접센서는 일정 등급 이상의 방수기능이 요구되었다. 실험에 사용된 근접센서(PRK08-2DP, Autonics)는 자연 상태의 수심 1m에 30분간 두어도 물이 들어가지 않는 IEC 규격 IP-67을 만족하였기 때문에, 수심 0.7m인 조파수조에서 사용이 가능하였다 [23]. 근접센서는 횡류터빈의 축 끝단에 삽입된 키(Key)를 검출물체로 하여 위치조정이 가능한 브라켓에 설치되었다. 펄스미터(MP5W, Autonics)는 터미널보드 하단에 설치되었으며, 근접센서에 의해 감지되는 신호의 주기를 측정 및 연산하여 4~20mA 출력신호를 데이터수집 장치로 전송하는 역할을 한다 [24]. Figure 4.9는 횡류터빈의 구성도를 나타낸 것이다.

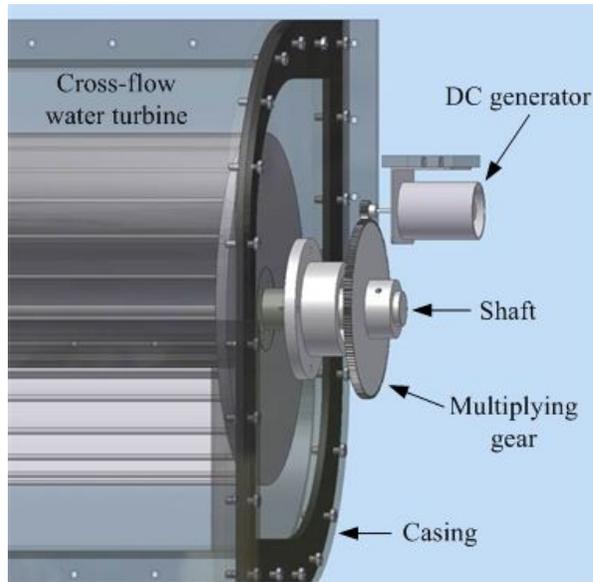


Fig. 4.9 Cross-flow water turbine assembly

웰즈터빈 및 횡류터빈의 출력을 비교하기 위하여 각 터빈에는 소형 영구 자석 직류모터를 발전기 대신 사용하였으며, 발전용 모터(이하 ‘발전기’ 라 칭함)의 양단에는 부하저항  $5\text{ k}\Omega$ 을 연결되었다. 터빈 출력 신호로써 저항 양단의 전압 신호가 터미널보드를 통하여 아날로그전압 입력모듈로 전달된다. 물론 토크미터를 사용하여 출력을 계측하는 것이 일반적인 방법이지만, 웰즈터빈의 경우에는 터빈의 크기가 작고 출력이 낮을 경우 회전하지 않을 가능성이 있었고, 정밀계측이 가능한 소형 토크미터는 장비가 고가이기 때문에, 본 실험에서는 소형 영구자석 직류모터를 사용하여 유입구 형상에 따른 상대적인 터빈 출력을 비교하는데 초점을 맞추었다. 영구자석 발전기의 유기 기전력은 회전속도에 비례하며, 웰즈터빈은 일반적으로 회전속도가  $0 \sim 500\text{ RPM}$  이므로 증속 없이 발전기와 터빈의 축을 커플링을 이용하여 연결하였다. 반면 횡류터빈은 회전속도가 웰즈터빈에 비하여 낮을 것으로 예상되었기 때문에, 발전기에 유기되는 기전력을 높이기 위하여 터빈 축에 기어를 설치하여 10배 증속시켰다. Figure 4.10은 웰즈터빈 구성도를 나타낸 것이다.

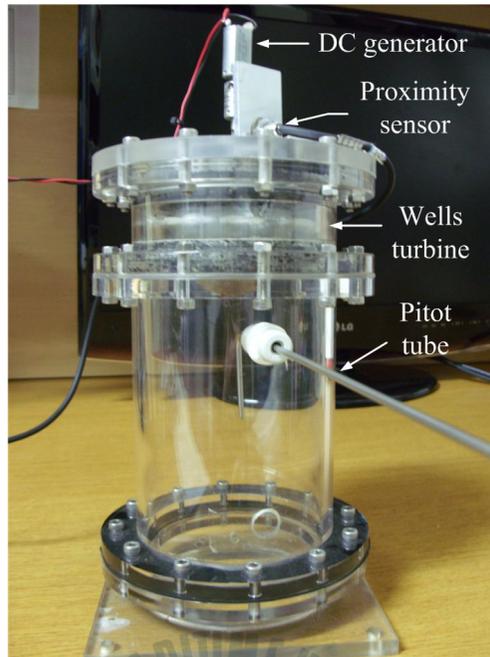


Fig. 4.10 Wells turbine assembly

웰즈터빈 하부 덕트의 공기압력은 피토투브와 압력센서를 이용하여 측정되었다. 피토투브(TPL-03-300, KIMO)는 직경 3 mm, 길이 300 mm인 L타입이 사용되었다. 피토투브의 입구는 전압  $P_T$  (Total pressure) 1 hole, 정압  $P_S$  (Static pressure) 6 holes의 스테인리스스틸로 구성되어 있으며, 각 출구는 분리되어 압력센서에 연결되었다 [25]. 압력센서(PSAN-COC1CV, Autonics)는 분해능이 1/2000 인 아날로그전압 출력형이며, -101.3 kPa부터 +100.0 kPa까지 측정이 가능하다 [26]. 피토투브는 Fig. 4.10과 같이 웰즈터빈 하부의 덕트에 설치되었으며, 전압  $P_T$  측 공기입구는 아래쪽을 향하고 있다.

진동수주 내부 수위변화는 초음파 레벨센서를 이용하여 측정되었으며, 진동수주 내부 상부 벽면에 고정된 브라켓에 설치되었다. 초음파 레벨센서(UM30-213113, SICK)는 200 ~ 1300 mm의 측정거리를 4 ~ 20 mA 범위의 아날로그 신호로 변환하여 출력신호를 보낸다. Figure 4.11은 진동수주 내부에 설

치된 초음파 레벨센서를 나타낸다 [27]. Table 4.4는 모형실험에 사용된 데이터수집 장치와 센서의 사양을 나타낸 것이다.



Fig. 4.11 Ultrasonic level sensor in the OWC chamber

Table 4.4 Specification of data acquisition device and sensors

Items	Model	Maker	Output	Measuring Range
Data acquisition device	CompactRIO (NI-9022)	National Instrument	-	-
	Analog Input Module (NI-6205)		-	$\pm 200$ mV to $\pm 10$ V
Pitot tube	TPL-03-300	KIMO	-	-
Pressure sensor	PSAN-C0C1CV	Autonics	4-20mA	- 101.3 kPa to + 100.0 kPa
Proximity sensor	PRL08-2DP	Autonics	below 200mA	1 kHz
Pulse meter	MP5W	Autonics	4-20mA	0.0005 Hz to 50 kHz
Ultrasonic level sensor	UM30-213113	SICK	4-20mA	200-1300 mm

### 4.3 데이터분석 프로그램

데이터분석 프로그램은 주파수 분석을 통하여 잡음의 일부를 제거할 수 있고, 수집된 데이터를 이용하여 파고와 유속 등 계산이 가능하다. 또한 데이터 분석 프로그램은 파형을 관찰하거나 수치를 확인하기 위하여 특정 데이터 구간을 선택하거나 위상을 조정할 수 있는 기능이 있다. Figure 4.12는 데이터분석 프로그램의 구조를 나타낸다. 데이터분석 프로그램은 모형실험을 통하여 수집한 데이터를 모니터링 시스템의 입력설정에 맞게 데이터를 가공 및 계산하여 Fig. 4.13과 같이 그래프 및 숫자로 모니터링 시스템에 표시한다.

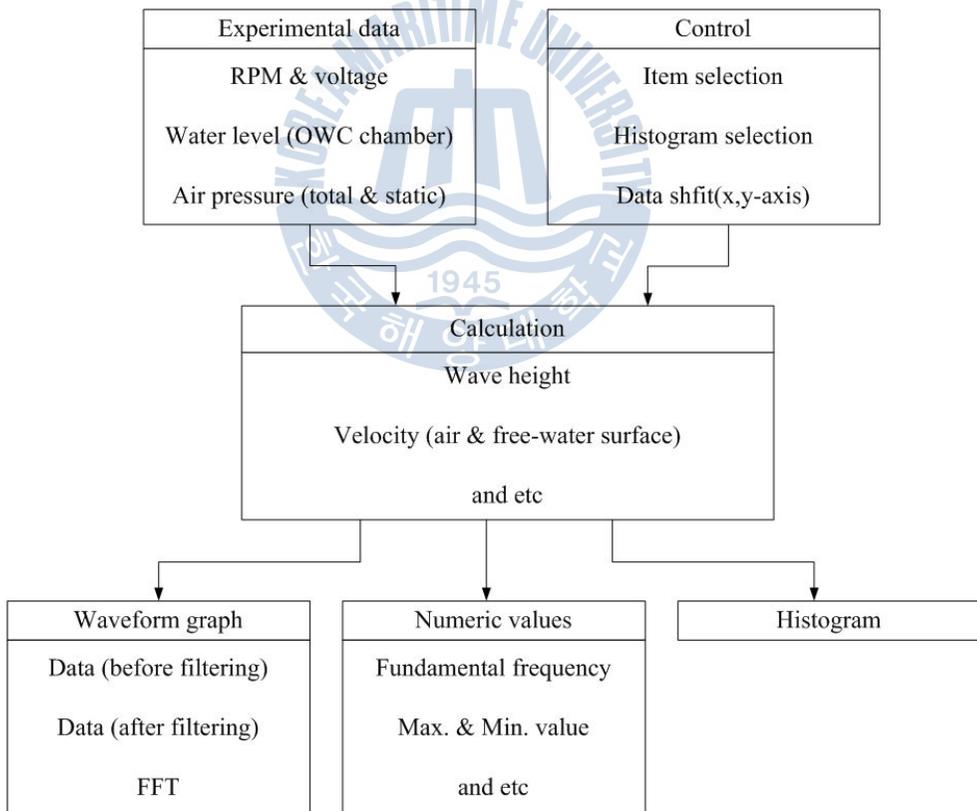


Fig. 4.12 Block diagram of data analysis program

Figure 4.13은 데이터분석용 모니터링 시스템을 보여준다. Figure 4.13에서 ①은 제어버튼을 나타낸다. 제어버튼은 파일열기, 파일읽기, 분석, 저장, 정지버튼 등으로 구성되어 있으며, 버튼을 눌러서 활성화시키면 해당 기능을 수행한다. ②는 수집된 데이터의 목록과 유입구 형상에 따른 히스토그램을 선택할 수 있는 버튼이다. ③은 데이터 구간 및 저역통과필터 주파수를 입력할 수 있는 입력창을 나타낸다. 데이터 구간 선택 창은 수집된 데이터양이 많을 경우, 전체 데이터 중에서 특정부분을 선택하여 분석할 수 있도록 하며, 시작부분의 인덱스와 데이터 길이를 입력하여 구간을 선택할 수 있다. 한편 저역통과필터는 특정 주파수 이하의 신호만 통과시켜서 고주파 잡음에 의한 영향을 최소화시킴으로써 신호식별을 용이하게 할 수 있다. 저역통과필터 주파수는 임의로 설정이 가능하다. ④는 데이터 파형을 나타낸 그래프(⑥)에서 가로축 및 세로축으로 각각 수평 이동이 가능한 입력창을 나타낸다. 이것은 각 유입구에 따른 모형실험에서 터빈의 기동시점을 일치시켜 비교를 용이하게 한다. ⑤는 가공된 데이터의 파일명을 설정할 수 있는 입력창을 나타낸다. 사용자는 입력창에 임의의 파일명을 입력하여 가공된 데이터 파일을 만들 수 있으며, 데이터는 스프레드시트 형태의 텍스트 파일로 저장된다. ⑥은 저역통과필터를 통과한 데이터의 파형을 나타낸다. 이는 시간에 따른 데이터 추이를 확인할 수 있게 하며, 각 유입구 형상에 따른 데이터 항목이 하나의 그래프에 나타내기 때문에 데이터 비교를 용이하게 한다. ⑦은 저역통과필터를 통과하기 전의 데이터파형을 나타낸다. 가공되지 않은 데이터는 잡음을 포함하고 있기 때문에 파형을 관찰하거나 비교하기 어려운 경우가 있으므로, 사용자는 저역통과필터 주파수를 조정(③)하여 필터를 통과한 데이터 파형을 그래프(⑥)으로 실시간 확인할 수 있다. ⑧은 데이터를 고속푸리에변환을 통하여 주파수영역으로 분석한 그래프를 나타낸다. ⑨는 필터를 통과한 데이터의 히스토그램을 나타낸다. 히스토그램은 데이터의 분포를 한 눈에 확인할 수 있게 한다. 특히 파고 계측과 관련하여 불규칙 파가 포함되어 있을 경우, 유의파고(파군 중 파고가 큰 순서

로 전체 파랑의 1/3까지 파랑들의 파고를 평균한 값)를 계산하는데 활용될 수 있다 [28]. ⑩은 유입구형상에 따른 각 데이터의 기본주파수와 데이터의 최대값 및 최소값을 숫자로 나타낸 것이다. 기본주파수는 저역통과필터 주파수 설정 시 활용될 수 있다.

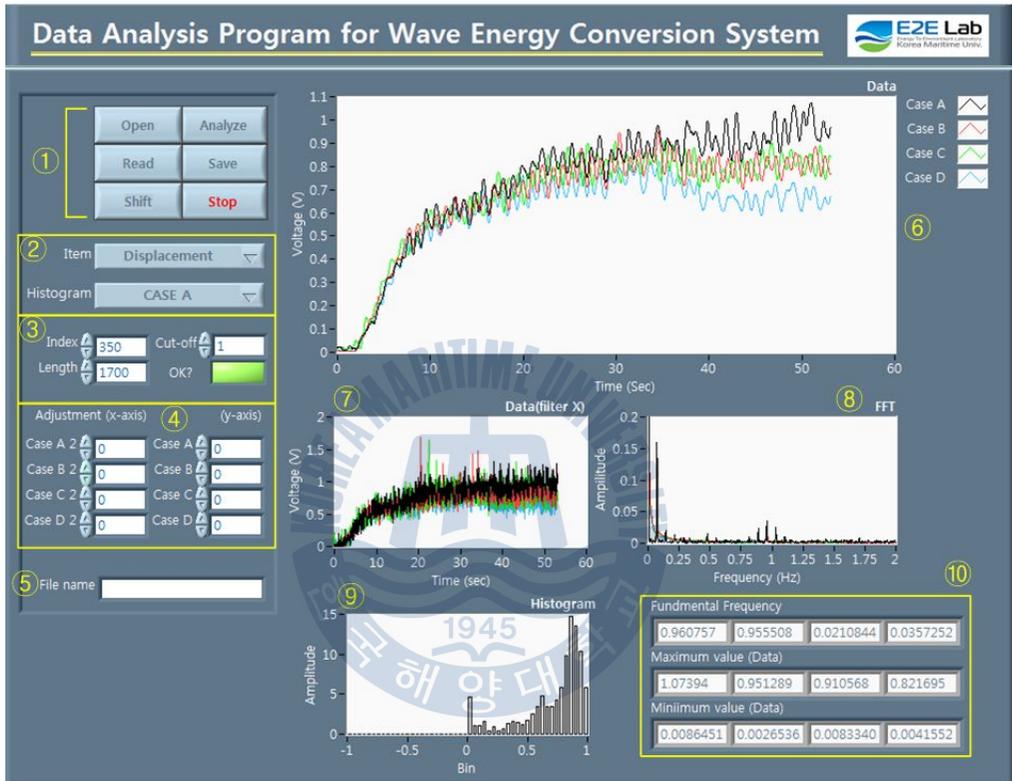


Fig. 4.13 Monitoring system for data analysis program using LabVIEW

데이터분석 프로그램은 LabVIEW의 상태머신(State machine)구조를 이용하여 설계되었다. 상태머신은 케이스(Case)구문이 While Loop에 삽입된 형태로서, 각 케이스구문의 실행조건을 미리 설정한 후, 시프트레지스터(Shift register)를 이용하여 현재상태를 저장하고, 이에 따른 해당 케이스구문을 실행시킨다. 데이터분석 프로그램에서는 기능에 따라서 7개의 상태로 구분하였다. Table 4.5는 각 상태에 따른 기능을 나타낸다 [29].

Table 4.5 Description of State

State		Description
1	Initialization	Initialize waveform graph
		Return file name & path
2	Read	Read text file
		Check data
3	Filter	FFT
		Low-pass filter
4	Calculation	Calculate air velocity
		Calculate vertical velocity of free-water surface in the OWC chamber
5	Monitor	Shift data (horizontal & vertical axis)
		Make waveform graph
6	Analysis	Make histogram
		Calculate wave height
		Find maximum, minimum value
		Analyze harmonic distortion
7	Save	Save data (after signal processing)

Table 4.5에서 상태 1은 웨이브폼 그래프를 초기화시켜 이전에 실행된 항목을 삭제하고, 파일경로 및 해당폴더 내에 있는 파일명을 반환하여 시프트 레지스터에 저장한다.

상태 2는 텍스트 파일로 저장된 데이터로부터 2D 데이터 배열을 읽어서, 데이터 점검(누락 점검) 후 시프트레지스터에 저장한다.

상태 3은 고속푸리에변환 함수를 사용하여 입력 데이터에 대한 결과를 반환하며, 저역통과필터함수를 이용하여 설정된 주파수 이하의 신호를 반환한다.

상태 4는 공기의 속도 및 진동수주 내부 자유수면의 수직방향 속도를 계산하여 시프트레지스터에 저장한다. 공기의 속도는 피토투브를 이용하여 측

정한 전압  $P_T$ 와 정압  $P_S$ 의 차( $P_D = P_T - P_S$ )를 이용하여 동압  $P_D$  (Dynamic pressure)를 구한 후, 식(4.2)을 이용하여 웰즈터빈 하부의 공기 속도  $V_A$ 를 계산할 수 있다. Figure 4.14는 피토투브를 이용한 공기의 전압 및 정압측정을 나타낸 것이다 [24].

$$V_A = 1.291 \sqrt{P_D} \quad (\text{at } 20^\circ\text{C}) \quad (4.2)$$

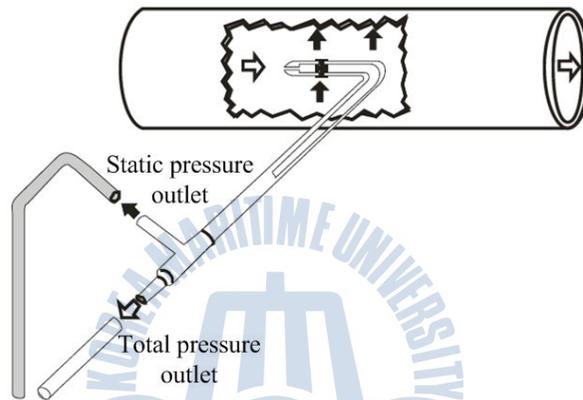


Fig. 4.14 Measurement of air pressure: total & static pressure using pitot tube

상태 5는 4종류의 유입구에 대한 실험데이터를 비교하기 위하여 웨이브폼 그래프에서 각 데이터의 가로축과 세로축의 기준점을 이동시킬 수 있는 기능을 가지고 있다. 그리고 선택된 구간의 숫자형 데이터는 웨이브폼으로 변환되어 그래프에 표시된다.

상태 6은 선택된 구간 내의 데이터를 웨이브폼으로 변환하여 히스토그램으로 나타낸다. 이는 웨이브폼 피크 검출(Waveform peak detection)함수를 이용하여 파고를 계산하며, 평균 및 최대 파고를 나타낸다. 진동수주 내부 파고는 수위 변화로부터 'Zero-up-cross' 방법을 적용하여 계산하였다. 이는 어느 상태에서 평균수면을 절단한 바로 그 시각에서 또 다시 평균수면을

자르는 시각까지의 시간간격을 주기로 정하여, 그 사이에서 해수면의 최고 위치와 최저위치간의 거리를 파고로 보는 것이다. Figure 4.15는 파고 측정 방법을 나타낸다 [30].

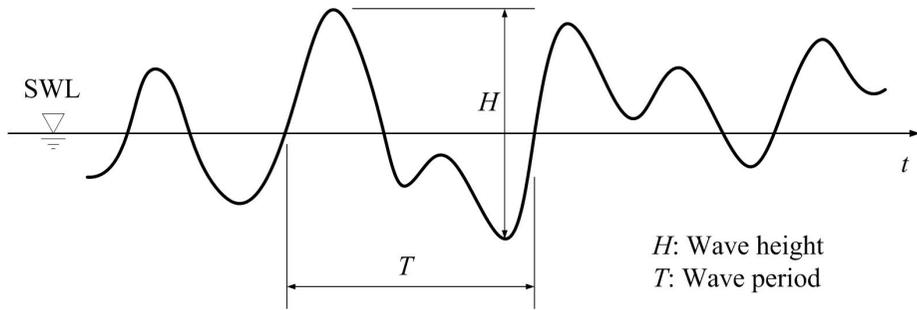


Fig. 4.15 Measurement method of wave height: Zero-up-cross

상태 7은 신호처리 후, 선택된 데이터를 각 유입구 종류에 따라 구분하여, 이를 텍스트 파일로 저장하는 기능을 가지고 있다. 상태 7 실행 후 상태는 상태 1로 바뀌어 시프트레지스터에 저장된다.

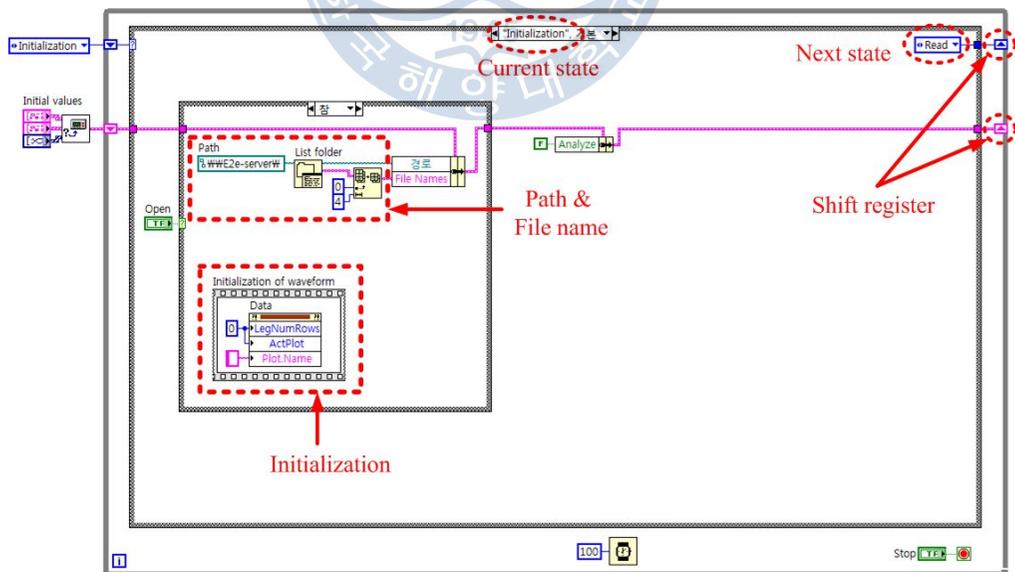


Fig. 4.16 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: initialization (state 1)

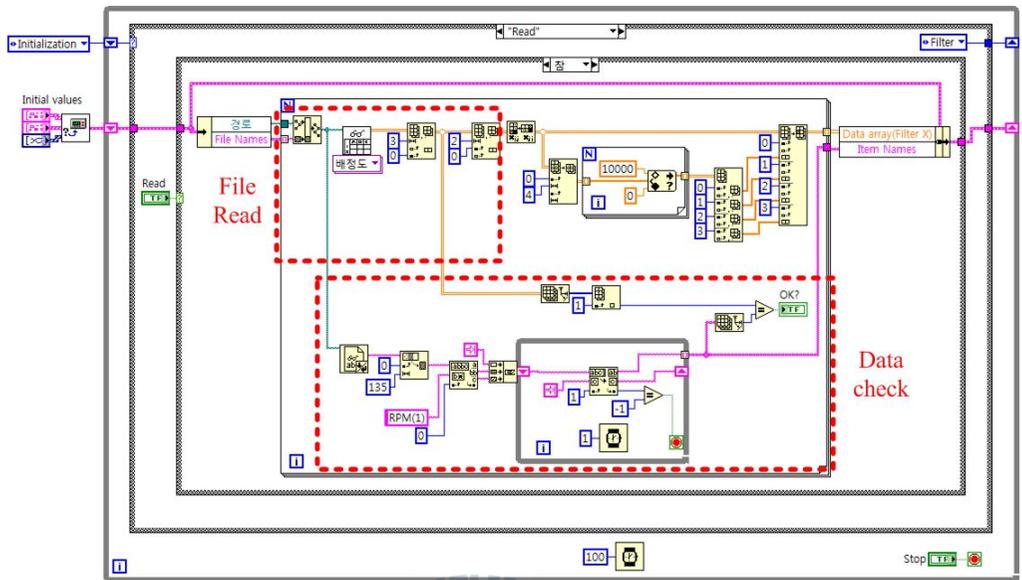


Fig. 4.17 Block diagram of data analysis program using LabVIEW:  
read (state 2)

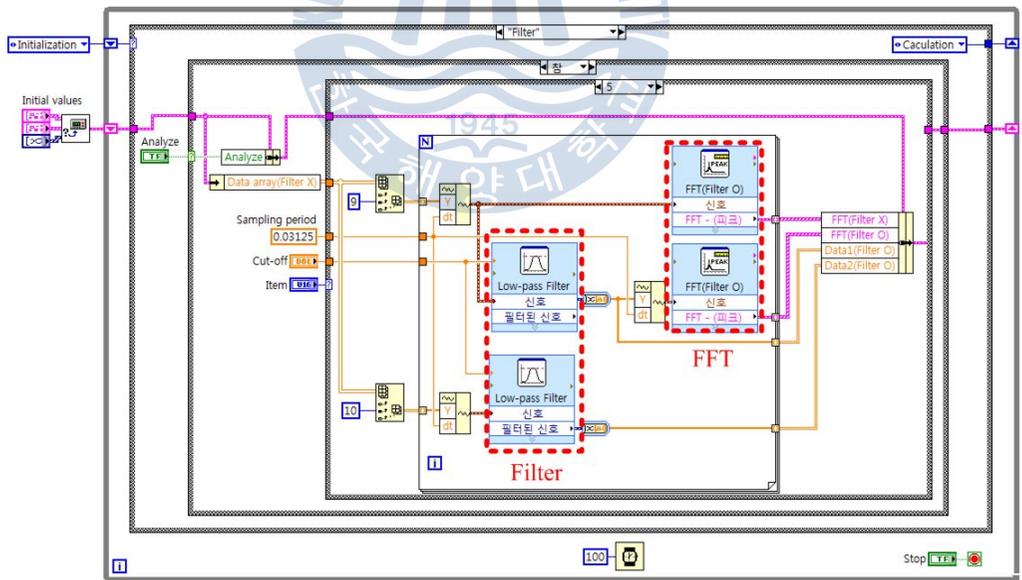


Fig. 4.18 Block diagram of data analysis program using LabVIEW:  
filter (state 3)

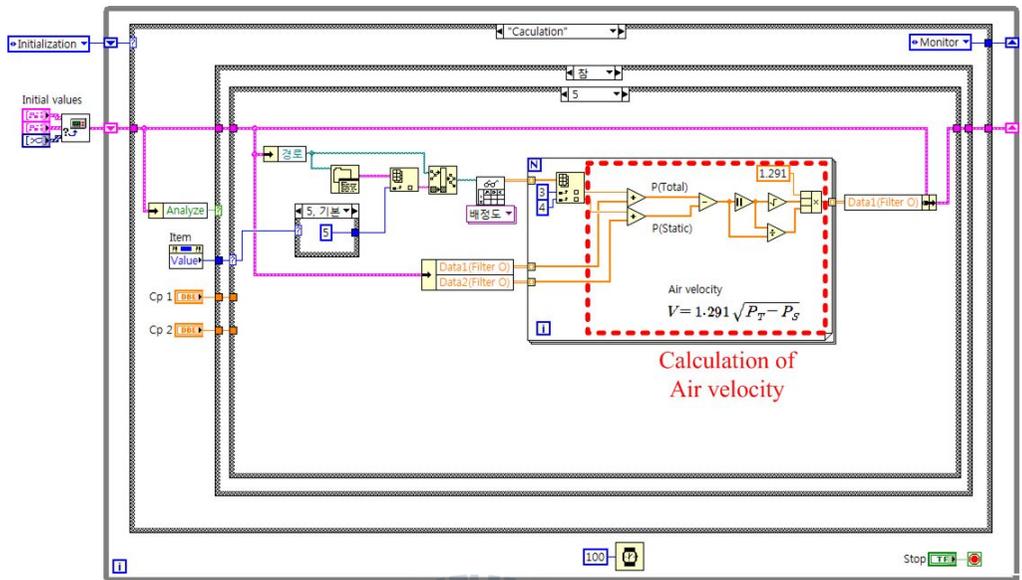


Fig. 4.19 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: calculation (state 4)

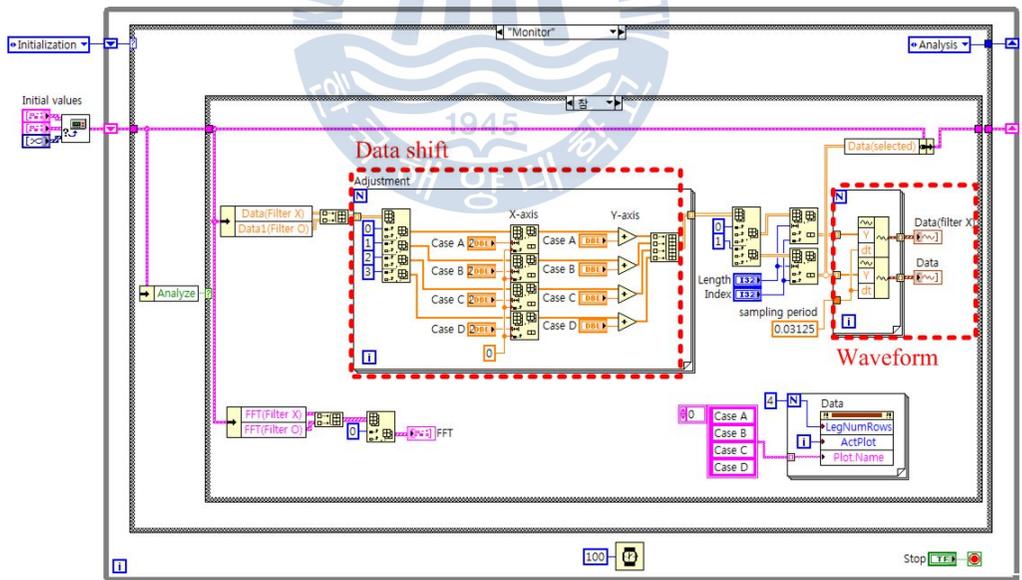


Fig. 4.20 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: monitor (state 5)

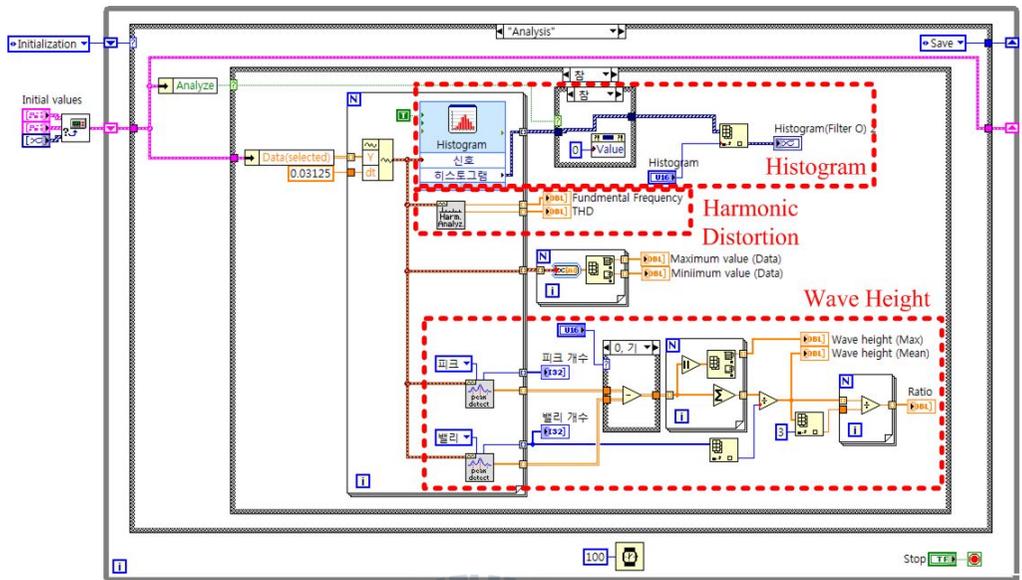


Fig. 4.21 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: analysis (state 6)

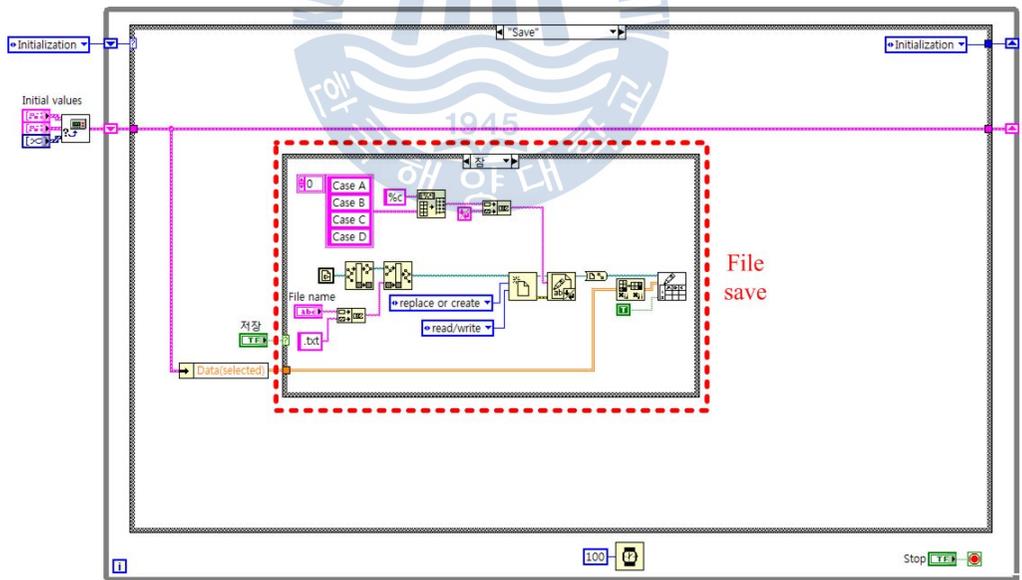


Fig. 4.22 Block diagram of data analysis program using LabVIEW: save (state 7)

## 제 5 장 실험 및 고찰

### 5.1 웰즈터빈과 횡류터빈의 회전속도

Figure 5.1은 웰즈터빈의 회전속도 파형을 보여준다. 그래프에 나타난 파형은 유입구형상에 따른 회전속도 비교가 용이하도록 웰즈터빈이 기동하는 시점이 동일하게 조정되었다. Case A에서 웰즈터빈의 회전속도는 시간이 흐를수록 증가하는 경향을 보이고 있으며, 4개의 파형 가운데 회전속도가 가장 빠르게 나타났다. Case B와 Case C는 웰즈터빈의 회전속도 차이가 작으며 일정한 범위 내에서 등락을 반복하고 있다. Case D의 경우, 웰즈터빈은 회전속도가 0으로 나타났는데, 이는 공기의 유동에너지가 터빈의 기동토크에 미치지 못한 것으로 보인다. Case A~C에서 웰즈터빈의 회전속도가 맥동하는 것은 진동수주 내부 수위변화에 따라 공기의 유동방향이 주기적으로 반대방향으로 바뀌기 때문에 생기는 현상으로 보인다.

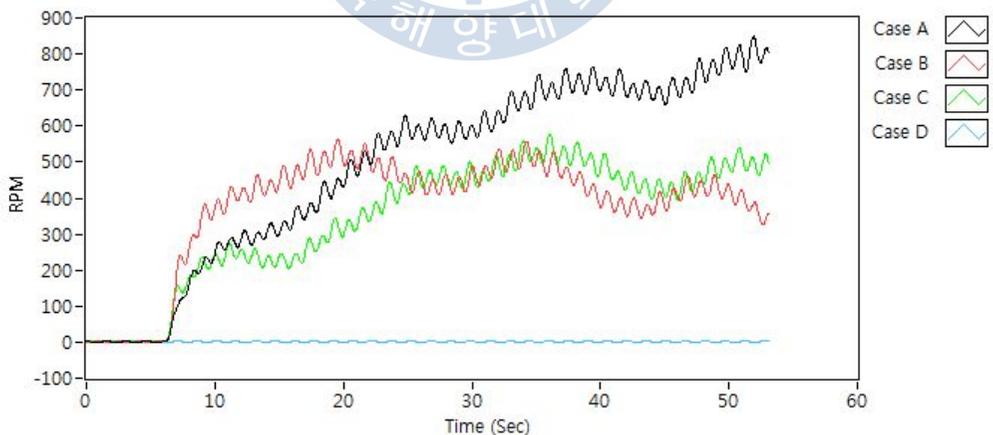


Fig. 5.1 Comparison of phase-shifted PRM by wells turbine versus time at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height

Figure 5.2는 유입구형상에 따른 웰즈터빈 평균 회전속도를 비교한 것이며, Fig. 5.1 그래프에서 30초 동안의 데이터 구간(20초~50초)을 선택하여 회전속도를 평균하여 나타낸 것이다. Case A~C의 웰즈터빈 평균 회전속도는 각각 652.341 RPM, 448.388 RPM, 456.975 RPM로 나타났으며, Case A에서 웰즈터빈의 평균 회전 속도는 Case B와 Case C에 비하여 약 200 RPM 높았고, Case B와 Case C의 경우 그 차이는 10 RPM 미만으로 나타났다.

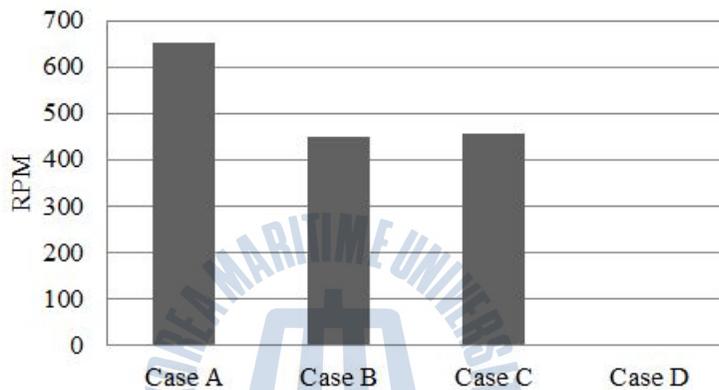


Fig. 5.2 Comparison for mean RPM by wells turbine between 20 sec and 50 sec

Figure 5.3은 횡류터빈의 회전속도 파형을 나타낸다. Case A에서 횡류터빈 회전속도는 시간의 흐름에 따라 점진적으로 증가하고 있으며, 가장 높게 나타났다. Case B와 Case C의 경우에는 횡류터빈의 회전속도가 일정범위 내에서 변동하고 있으며, 파형이 유사하다. Case D는 횡류터빈 기동 후 회전속도가 약 30 RPM까지 상승하다가 일정부분 감소하였으며, 4개 유입구형상 가운데 회전속도가 가장 느리게 나타났다. 횡류터빈은 기동초기에 계단형상의 파형을 보이며, 일정시간이 지난 후에는 각 유입구형상에 따라서 25~40 RPM 범위 내에서 변하고 있다. 횡류터빈은 웰즈터빈에 비하여 맥동이 작고 회전속도 변화폭도 작게 나타났는데, 이는 관성이 상대적으로 크기 때문에 생기는 현상으로 보인다.

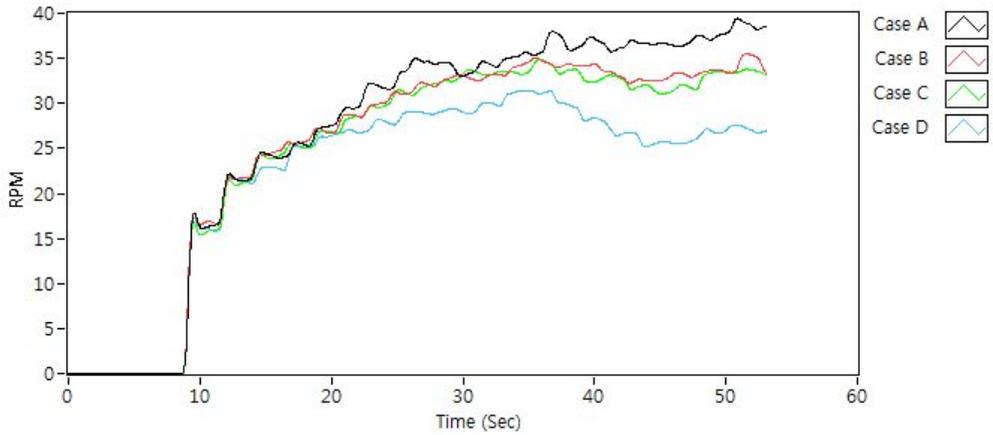


Fig. 5.3 Comparison of phase-shifted PRM by cross-flow turbine versus time at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height

Figure 5.4는 Figure 5.3과 같은 방법으로 횡류터빈의 평균 회전속도를 비교한 것이며, Table 5.1은 웰즈터빈과 횡류터빈의 최대 회전속도와 평균 회전속도를 보여준다. Case A의 경우, 횡류터빈은 평균 34.877 RPM으로 다른 Case에 비하여 가장 높게 나타났다. Case B와 Case C의 경우, 각각 32.529 RPM, 32.071 RPM으로 그 차이가 크지 않으며, Case D의 경우 횡류터빈의 회전속도가 28.206 RPM으로 가장 낮게 나타났다.

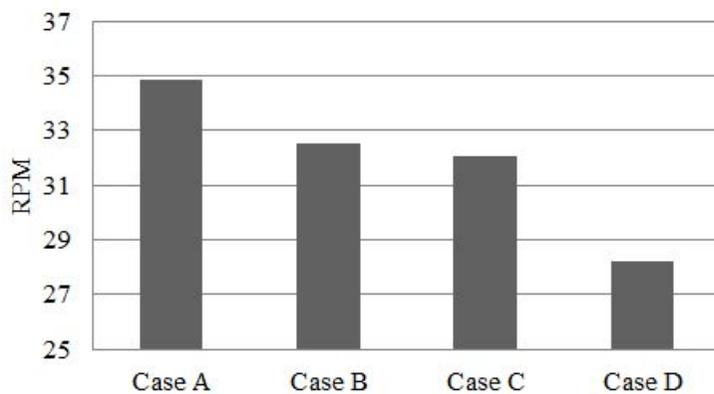


Fig. 5.4 Comparison for mean RPM by cross-flow water turbine between 20 sec and 50 sec

Table 5.1 RPM by both wells turbine and cross-flow water turbine between 20 sec and 50 sec

RPM		Case A	Case B	Case C	Case D
Wells turbine	Max.	848.34	563.124	576.586	0
	Mean	652.341	448.388	456.975	0
Cross-flow water turbine	Max.	39.426	35.483	34.847	31.441
	Mean	34.877	32.529	32.071	28.206



## 5.2 발전기 출력 전압

Figure 5.5와 Fig. 5.6은 각각 웰즈터빈과 횡류터빈의 축에 연결된 영구 자석 발전기의 출력 측 전압파형을 보여준다.

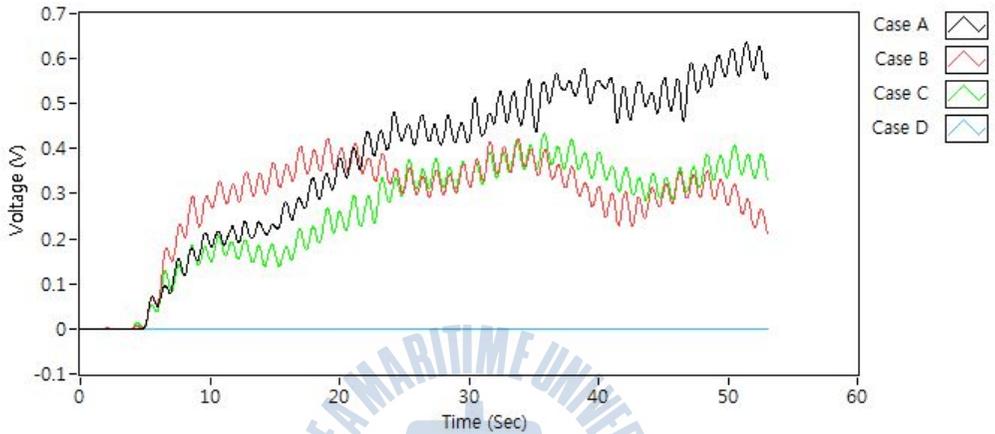


Fig. 5.5 Comparison of phase-shifted output voltage from DC generator by wells turbine versus time at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height

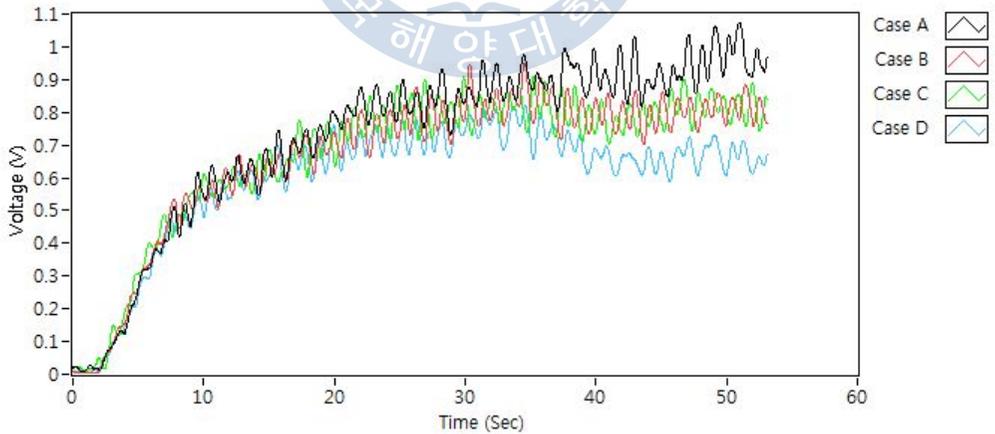


Fig. 5.6 Comparison of phase-shifted output voltage from DC generator by cross-flow water turbine versus time at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height

Figure 5.5에서 영구자석 발전기의 유기 기전력은 회전속도에 비례하기 때문에, 웰즈터빈 발전기 전압이 Fig. 5.1과 같이 웰즈터빈 회전속도 파형과 거의 동일하게 나타났다. 또한 Figure 5.6도 Fig. 5.2의 파형과 유사한 경향을 보이고 있으나, 잡음이 일부 포함되어 있다.

Figure 5.7은 웰즈터빈과 횡류터빈 발전기의 평균 전압을 비교한 것이고, Table 5.2는 웰즈터빈과 횡류터빈의 최대 전압과 평균 전압을 나타낸 것이다. Case A~C에서 웰즈터빈 발전기의 평균 전압은 각각 0.4865 V, 0.3303 V, 0.3391 V이며, Case D는 터빈이 회전하지 않았기 때문에 0 V로 나타났다. 한편 Case A~D에서 횡류터빈 발전기의 평균 전압은 0.8812 V, 0.7949 V, 0.7988 V, 0.7028 V이고, Case A가 Case D에 비하여 약 25% 높게 나타났다.

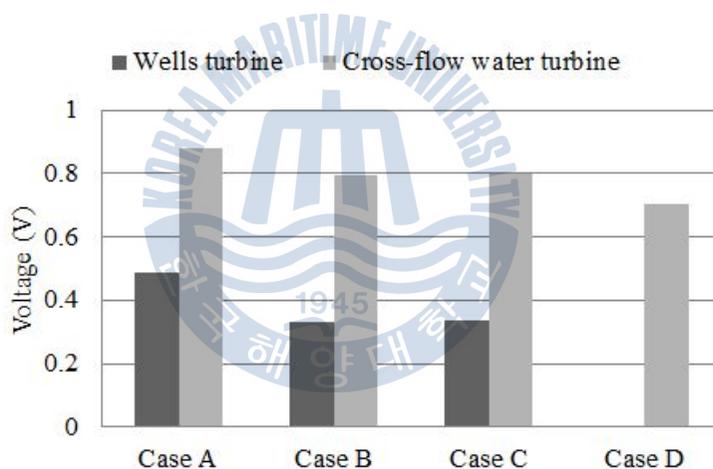


Fig. 5.7 Comparison for mean output voltage by both wells turbine and cross-flow water turbine between 20 sec and 50 sec

횡류터빈의 경우 회전속도가 웰즈터빈에 비하여 느리지만 출력 전압이 높은 이유는 각 터빈에 설치된 발전기 용량이 종류가 다르기 때문이다. 횡류터빈 발전기 용량이 크기 때문에 회전속도가 느려도 발전기에 유기되는 기전력이 상대적으로 크게 나타난다. 그리고 횡류터빈의 축에는 Fig. 4.9와

같이 증속기어가 연결되어 있기 때문에 발전기 축의 회전속도는 횡류터빈의 회전속도보다 10배 빠르다. 또한 웰즈터빈은 파랑에너지를 공기에너지로 1차 변환시킨 후 공기 유동에너지를 이용하여 터빈을 회전시키지만, 횡류터빈은 파랑에너지를 다른 형태로 변환시키지 않고 그대로 사용하기 때문에 상대적으로 에너지밀도가 높아서 회전속도는 낮지만 출력은 큰 특징이 있다.

Table 5.2 Output voltage from DC generator by both wells turbine and cross-flow water turbine between 20 sec and 50 sec

Output voltage		Case A	Case B	Case C	Case D
Wells turbine	Max.	0.6353	0.4226	0.4332	0
	Mean	0.4865	0.3303	0.3391	0
Cross-flow water turbine	Max.	1.074	0.9513	0.9106	0.8217
	Mean	0.8812	0.7949	0.7988	0.7028

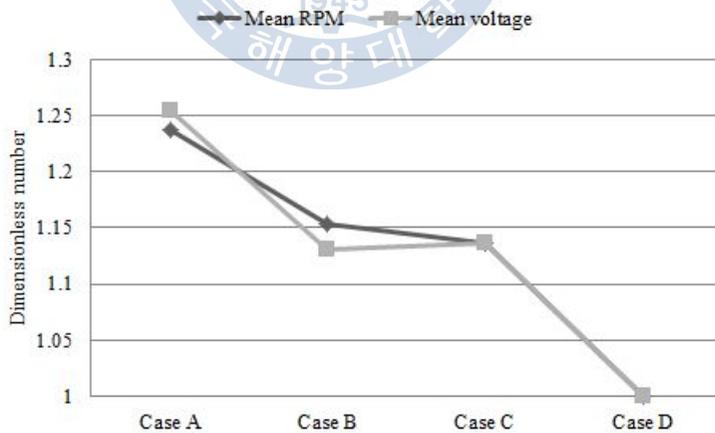
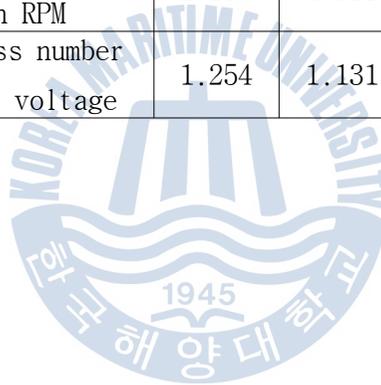


Fig. 5.8 Comparison of dimensionless number for mean output voltage by both wells turbine and cross-flow water turbine between 20 sec and 50 sec

Figure 5.8과 Table 5.3은 Case A~C의 횡류터빈 평균 회전속도와 발전기 평균 전압을 Case D에 대한 무차원수로 나타내어 비교한 것이다. Case A~C에서 횡류터빈 평균 회전속도에 관한 무차원수는 각각 1.237, 1.153, 1.137이며, Case B와 Case C는 Case D에 비하여 약 14~15% 높게 나타났다. 한편 Case A~C에서 횡류터빈 평균 전압에 관한 무차원수는 평균 회전속도에 관한 무차원수와 유사하였다.

Table 5.3 Dimensionless number of both mean RPM and output voltage from DC generator by cross-flow water turbine

	Case A	Case B	Case C	Case D
Dimensionless number for mean RPM	1.237	1.153	1.137	1
Dimensionless number for output voltage	1.254	1.131	1.137	1



### 5.3 진동수주 내부 수위변화

Figure 5.9는 진동수주 내부 수위변화를 나타낸다. 수위변화는 정현파에 가까우며, 각 유입구 형상에 따라 자유수면의 수위 변화의 폭에 차이가 발생하였다. Case A에서 자유수면의 최대 평균 수위가 112.089mm로 가장 높게 나타났고, 그 다음으로 Case C > Case B > Case D 순으로 높게 나타났지만, 그 차이는 2mm 내외로 미미하였다. 공기가 비압축성이라고 가정할 때 진동수주 내부에서 유량의 증가가 의미하는 것은 식(3.7)~식(3.9)와 같이 터빈에서 이용 가능한 에너지가 증가하는 것을 의미한다고 볼 수 있다.

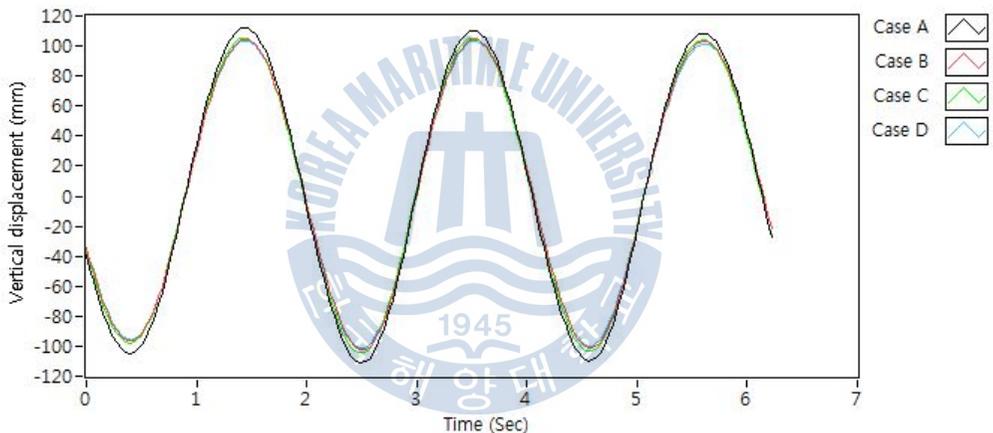


Fig. 5.9 Comparison of phase-shifted vertical displacement for free-water surface in OWC chamber versus time at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height

Table 5.4는 진동수주 내부 자유수면의 수직방향 변위 및 평균 파고를 보여준다. 수직방향 변위 및 평균파고는 Case A > Case C > Case B > Case D 순으로 높았으며, Case A의 평균파고는 Case D에 비하여 약 17 mm 높게 나타났다. Case A를 제외한 경우, 평균파고는 5 mm 내외로 차이가 발생하였으며 유입구형상에 따른 파고는 차이가 미미하였다.

Table 5.4 Vertical displacement of free-water surface and mean wave height in the OWC chamber

	Case A	Case B	Case C	Case D
Max. vertical displacement (mm)	112.089	104.351	105.378	103.192
Min. vertical displacement (mm)	-111.06	-102.551	-104.358	-101.252
Mean wave height (mm)	218.78	204.027	206.725	201.523

Figure 5.10은 진동수주 내부 평균 파고를 비교한 것이다. Case A~D 경우 진동수주 챔버의 내부 파고는 모두 입사파의 파고 130 mm 보다 높는데, 이는 공진현상(진동을 일으키는 어떤 물체의 진동 영향을 받아 다른 물체가 진동을 일으킴으로 진동이 증폭하는 현상)이 일어난 것으로 보인다 [31].

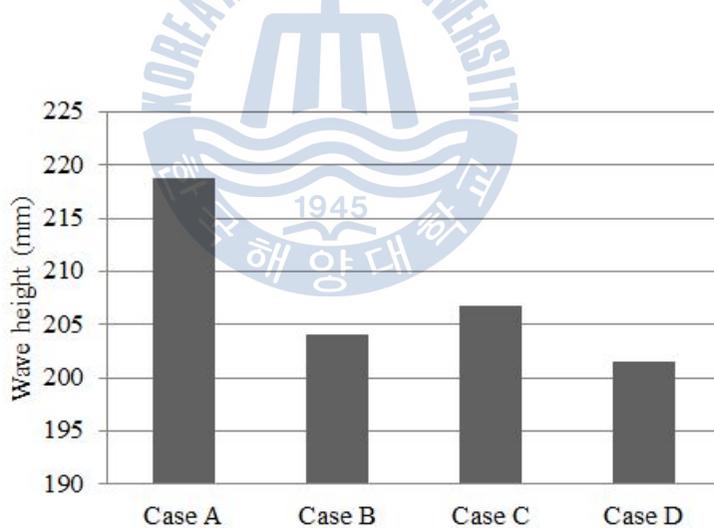


Fig. 5.10 Comparison of mean wave height in the OWC chamber

Figure 5.11은 Case D에 대한 Case A~C의 진동수주 내부 평균 파고 비율을 무차원수로 나타내어 비교한 것이다. Case A~C에서 평균 파고에 대한

무차원수는 각각 1.086, 1.012, 1.026이며, Fig. 5.8에 나타난 횡류터빈 발전기 전압에 대한 무차원수 보다 낮은 수치이다. Case A를 제외한 Case B~Case C의 경우 유입구 형상에 따른 진동수주 내부 파고의 영향이 상대적으로 작은 것으로 나타났다.

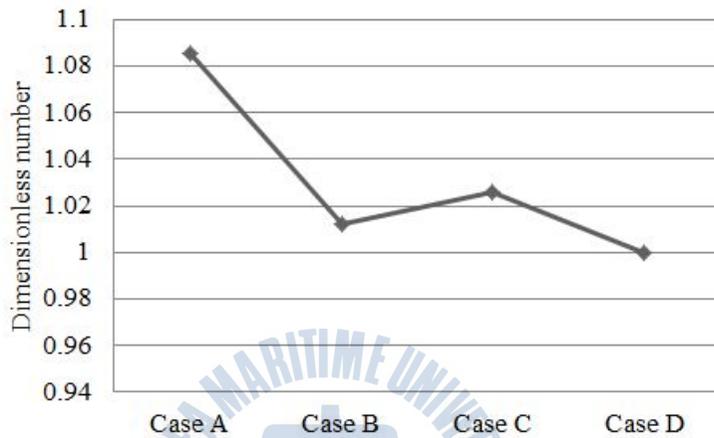


Fig. 5.11 Comparison of dimensionless number for mean wave height in the OWC chamber

## 5.4 웰즈터빈 입구의 공기 속도

Figure 5.12는 식(4.2)을 이용하여 각 유입구 형상별로 웰즈터빈 하부 덕트에서의 공기 속도를 계산하여 그래프로 나타낸 것이다. 공기의 속도변화는 정현파와 유사한 파형을 나타내며, 공기 속도가 음수로 표시된 것은 웰즈터빈을 통하여 공기가 진동수주 내부로 유입되는 것을 의미한다.

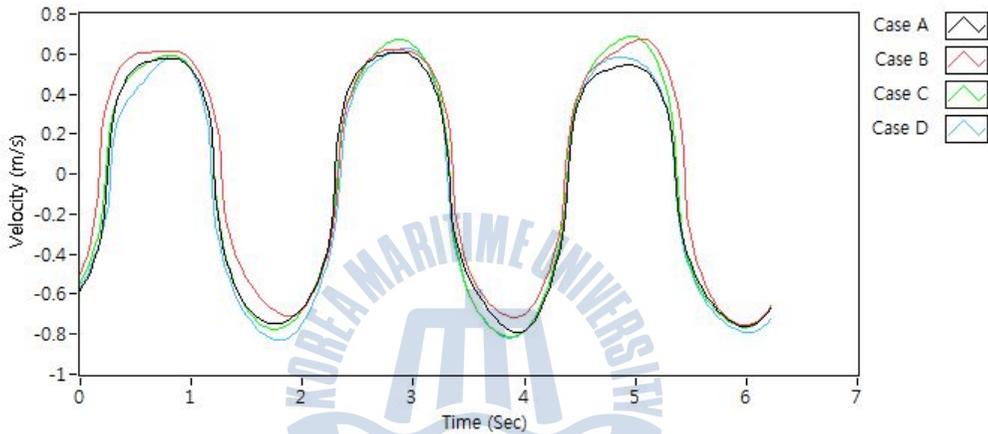


Fig. 5.12 Comparison of phase-shifted air velocity under the wells turbine versus time at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height

Figure 5.13은 웰즈터빈 하부 측 공기 평균 속도를 나타낸 것이다. 공기 속도가 증가하는 것은 진동수주 챔버 내부의 자유수면이 수직방향으로 상승하는 것을 의미한다. Case A~D 모두 웰즈터빈을 통하여 유입되는 속도가 유출되는 속도보다 빠르게 나타났다. 모형실험에서 웰즈터빈 상부의 공기 유입구 부분은 Case D 형상으로 되어 있고, 유입구 면적이 작아서 외부로부터 공기가 유입되는 속도가 상대적으로 낮을 것으로 예상하였으나, 실험결과는 다르게 나타났다. 상승기간과 하강기간의 평균유속은 Case C > Case D > Case B > Case A 순으로 나타났다.

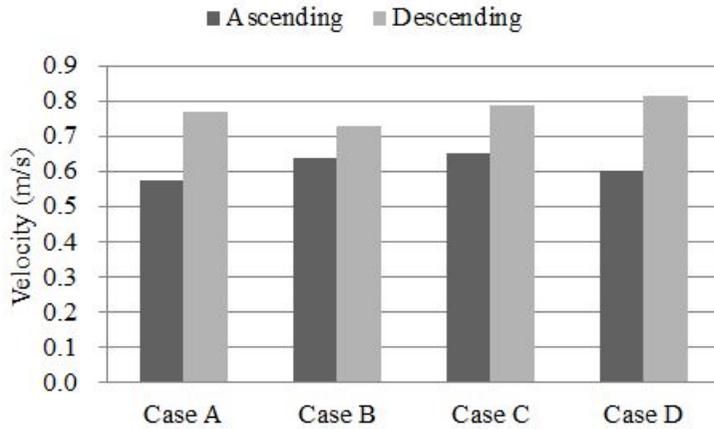


Fig. 5.13 Comparison of mean air velocity under the wells turbine when free-water surface is ascending and descending in the OWC chamber

Table 5.5는 웰즈터빈 하부 측 공기의 최대 속도와 평균 속도를 나타낸 것이다. Case A에서 상승기간 동안 공기의 평균속도는 약 0.58m/s로, 4개의 유입구 중에서 공기속도가 가장 느리게 나타났고, Case B와 Case C는 Case D에 비하여 공기속도가 6~8% 가량 빠르게 나타났다. Case D에서 공기 평균 속도가 빠르게 나타난 현상은 Case A~C의 경우와는 달리 웰즈터빈이 회전하지 않았기 때문에, 터빈의 회전에 의한 속도에너지 감소분이 낮아서 생긴 현상으로 보인다.

Table 5.5 Air velocity under wells turbine when free-water surface is ascending/descending in OWC chamber

		Case A	Case B	Case C	Case D
Ascending	Max. (m/s)	0.6072	0.6724	0.6881	0.6285
	Mean (m/s)	0.5771	0.6377	0.6504	0.6003
Descending	Max. (m/s)	0.7940	0.7561	0.8152	0.8284
	Mean (m/s)	0.7683	0.7273	0.7860	0.8139

Figure 5.14는 Case D에 대한 Case A~C의 공기 평균 속도 비율을 무차원수로 나타낸 것이다. 진동수주 내부 공기가 외부로 유출될 때 Case A~C에 대한 무차원수는 각각 0.9613, 1.0622, 1.0834 이며, 진동수주 내부로 공기가 유입될 경우에는 무차원수가 각각 0.9440, 0.8936, 0.9657로 나타났다. Case A의 경우 공기 평균 속도가 증가할 때와 감소할 때의 무차원수가 거의 동일하였으나, Case B와 Case C의 경우 공기 평균 속도가 상승하는 경우에만 무차원수가 Case D에 비하여 약 6~8% 높게 나왔다.

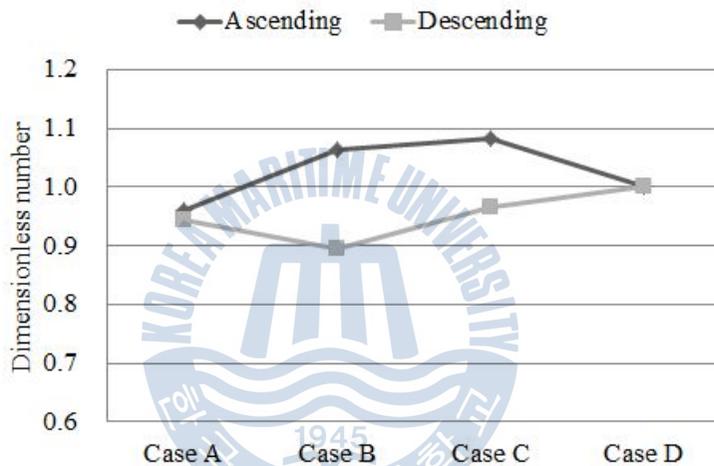


Fig. 5.14 Comparison of dimensionless number for mean air velocity under the wells turbine when free-water surface is ascending and descending in the OWC chamber

## 5.5 진동수주 내부 자유수면의 속도

Figure 5.15는 진동수주 내부 자유수면의 수직방향 속도를 나타낸다. 진동수주 내부 자유수면의 속도는 Fig. 5.9의 변위를 미분하여 나타내었으며, 파형은 정현파에 가깝다. Case A를 제외한 경우 각 유입구형상에 따른 진동수주 내부 자유수면 속도 편차는 미미하게 나타났다.

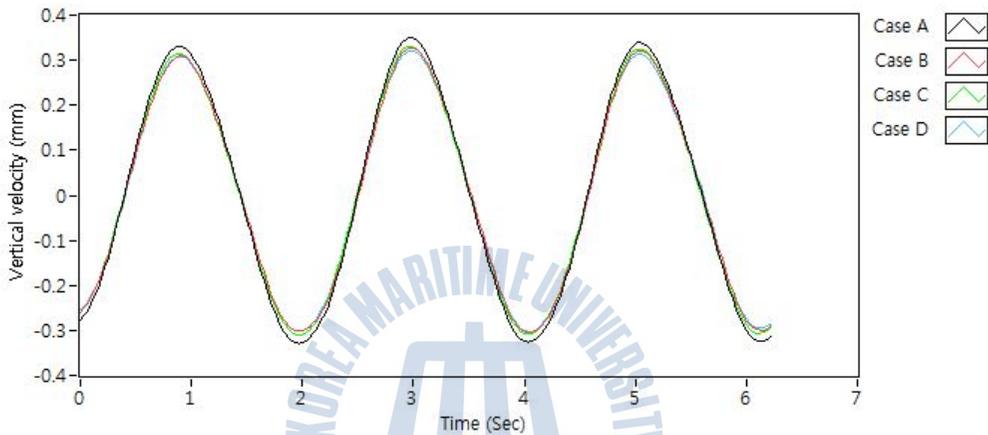


Fig. 5.15 Comparison of phase-shifted free-water surface velocity in OWC chamber versus time at 2.0 sec in wave period, 0.13m in wave height

Table 5.6 Velocity of free-water surface in the OWC chamber

		Case A	Case B	Case C	Case D
Ascending	Max. (m/s)	0.3501	0.3290	0.3315	0.3218
	Mean (m/s)	0.3402	0.3201	0.3237	0.3142
Descending	Max. (m/s)	0.3292	0.3049	0.3102	0.3029
	Mean (m/s)	0.3265	0.3022	0.3080	0.2994

Figure 5.16은 진동수주 내부 자유수면의 평균 속도를 비교한 것을 나타내며, Table 5.6은 자유수면의 최대 속도 및 평균 속도를 보여준다. 자유수

면의 평균 속도는 진동수주 내부 수위가 상승할 때 Case A~D에 대한 자유수면의 평균 속도는 0.3402 m/s, 0.3201 m/s, 0.3237 m/s, 0.3142 m/s로 나타났다으며 웰즈터빈 하부 측 공기 속도와 반대로 자유수면이 상승할 때 Case A > Case C > Case B > Case D 순으로 평균 속도가 빠르게 나타났다.

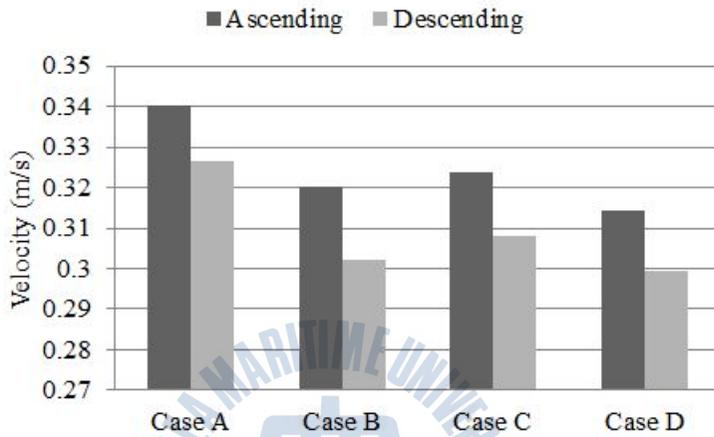


Fig. 5.16 Comparison of mean free-water surface velocity in the OWC chamber

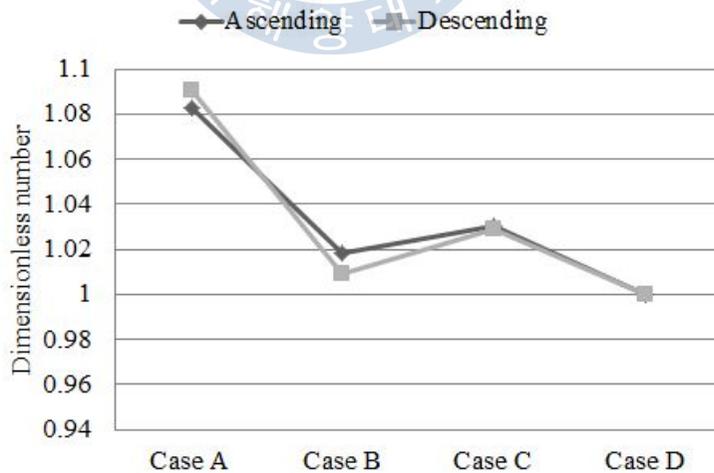


Fig. 5.17 Comparison of dimensionless number for mean velocity of free-water surface in the OWC chamber

Figure 5.17은 Case D에 대한 Case A~C의 자유수면 평균 속도 비율을 무차원수로 나타낸 것이다. Case A는 Case D에 비하여 자유수면의 평균속도가 약 8.7% 빠르며, Case B와 Case C는 Case D에 비하여 약 1.4%, 3.0% 가량 빠르게 나타났지만, 그 차이는 크지 않았다. Figure 5.17은 Fig. 5.11에 나타난 무차원수와 거의 동일하게 나타났다.

모형실험에서 Case A는 공기 속도를 제외한 모든 경우에서 Case D에 비하여 성능이 상대적으로 약 8~25% 높게 나타났으며, Case C는 Case B보다 높게 나타났지만 차이는 미미하였다. 그리고 Case D의 경우 Fig. 2.8에 제시된 바와 같이 유입구형상에 의한 손실이 가장 크게 나타났다. 모형실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교할 경우, 해수유입구형상에 따른 수두손실 경향은 비슷하게 나타났지만, 상대적 차이는 모형실험에서 더욱 크게 나타났다. 이는 시뮬레이션에서는 공진현상을 고려하지 않았고, 정상상태에서의 유인손실계수를 왕복류에 적용하였을 뿐만 아니라 다수의 가정을 포함하기 때문으로 판단된다.

Figure 4.3에서 유입구 타원곡면의 이심율이 0인 Case B ( $\theta = 45^\circ$ )와 수평방향 성분이 수직성분의 길이 보다 작은 Case C ( $\theta = 60^\circ$ )의 경우에는 유입구형상에 따른 손실 차이가 작게 나타났다. 반면, 유입구 타원곡면의 수평방향 성분이 수직방향 성분보다 큰 Case A에서는 유입구 형상에 따른 손실 차이가 크게 나타났다. 특히 이심율이 0.884인 Case A ( $\theta = 25^\circ$ )에서 유입구가 직각인 Case D에 비하여 횡류터빈 발전기 전압이 약 25% 높게 나타났다. 이는 유입구형상이 곡면이 아닌 평면일 때, 입구각이  $15^\circ$  에서 파력발전 성능이 향상된 결과와 유사하다. 그러나 유입구 타원곡면에서 수평방향 성분의 길이가 길어질 경우 이에 따른 손실도 발생할 것으로 예상되므로, 성능을 보다 향상시키려면 이심율이 0.884~1 사이의 타원곡면을 적용한 추가실험이 필요할 것으로 생각된다 [6-11].

## 제 6 장 결 론

본 논문은 웰즈터빈과 횡류터빈이 설치된 방과제 부착형 파력발전시스템을 대상으로 하며, 연구목적은 해수유입구형상에 따른 파력발전 성능을 비교하여, 출력특성을 분석하고 효율성을 평가하는데 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 단면이 직사각형이고 타원곡면으로 된 유입구 형상을 제안하였으며, 타원곡면의 형상에 따른 성능을 확인하기 위하여 LabVIEW를 이용한 시뮬레이션과 모형실험을 수행하였다.

시뮬레이션에서는 입사파를 사인파로 가정하여 파고와 주기가 일정한 상태에서 진동수주 내부 자유수면의 속도, 파고 및 이용 가능한 에너지를 비교하였다. 그 결과 점성에 의한 영향과 공진을 고려하지 않은 상태에서 유입손실계수에 따른 출력 차이는 약 4% ~ 6%로 나타났다. 한편, 모형실험에서는 해수유입구형상을 타원곡면에 따라 4종류로 구분하여 2차원 조파수조에서 수행하였으며, 각 터빈의 회전속도, 발전기 전압, 진동수주 내부 수위를 측정하였다. 그 결과 타원곡면의 수평방향 성분이 수직방향 성분보다 큰 경우 상대적으로 성능이 높게 나타났으며, 특히 유입구 측 타원곡면의 이심률이 약 0.884일 때 유입구형상이 직각인 경우에 비하여 횡류터빈 발전기 출력 전압이 약 25% 높게 나타났다.

실험결과를 통하여 방과제 부착형 파력발전시스템에서 해수유입구의 측면형상은 수평방향 성분의 길이가 수직방향 성분보다 긴 타원곡면으로 설계할 경우 유입손실을 감소시켜 에너지변환효율을 높인다고 유추할 수 있다. 본 논문에 제시된 실험결과는 방과제 부착형 파력발전시스템의 해수유입구 형상 설계에 관한 청사진을 제시한다는 점에서 의미가 있다. 더불어 해수유입구형상을 세분화하고, 실해역의 파랑조건, 지형을 고려한 실증연구를 수행하여 보완할 필요가 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Douglas Westwood, The World Wave & Tidal Report 2011-2015, 2011
2. UNFCC. Climate Change Information Center Home page. Retrieved May 5, 2012 from <http://www.climate.go.kr/>
3. Renewable Energy Retrieved May 5, 2012 from [http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy)
4. Based in part on the thesis submitted by S.Y. Bae for M.S. degree in mechatronics engineering, Korea Maritime University, 2010
5. 신승호, 홍기용, “파력발전 기술개발 현황과 상용화 요건”, 대한조선학회지, 제48권, 제3호, pp. 27~36, 2011
6. M.T. Morris-Thomas, R.J. Irvin and K.P. Thiagarajan, “An Investigation into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column”, Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol.129, No. 4, pp. 273~278, 2007
7. R.S. Tseng, R.H. Wu and C.C. Huang, “Model Study of a Shoreline Wave Power System”, Ocean Engineering, Vol. 27, No. 8, pp. 801~821, 2000
8. J. Fukutomi and Y. Nakase, “Cross-flow Turbine with Axisymmetric Casing for Wave Power Conversion”, The fifth Asian International Conference on Fluid Machinery, pp. 849-856, Seoul, Korea, October 6-8, 1997
9. 최영도, 김창구, 김유탉, 이영호, “파력발전용 횡류형 수력터빈의 노즐형상에 관한 연구”, 유체기계저널, 제11권, 제3호, pp. 30~35, 2008

10. 최영도, 조영진, 김유탉, 이영호, “파력발전용 횡류형 수력터빈의 성능 및 내부유동”, 유체기계저널, 제11권, 제3호, pp. 22~29, 2008
11. 조영진, 최영도, 김유탉, 이영호, “파력발전용 직접 구동터빈의 전방 가이드노즐 형상에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회 공동학술대회 논문집, pp. 163~164, 2008
12. The Carbon Trust, Oscillating Water Column Wave Energy Converter Evaluation Report, 2005
13. Wave height, Retrieved May 5, 2012 from <http://100.naver.com/100.nhn?docid=156907>
14. Wavelength, Retrieved May 5, 2012 from <http://100.naver.com/100.nhn?docid=180239>
15. Wave period, Retrieved May 5, 2012 from <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=382558>
16. McCormick, ME, and David, L. “Ocean Wave Energy Conversion”, John Wiley & Sons, Inc, pp 61-71, 146-147, 1981
17. Banki Turbine, Retrieved May 5, 2012 from <http://cafe.naver.com/renewableenergy/11611>
18. 윤석범, 김민수, 조병수, 이찬규, 임동주, 김진구, “유체역학”, 형설출판사, 2006
19. J.S. Oh and S.H. Han, “Inlet Geometry Effect of Wave Energy Conversion System”, to be published Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 26, No. 9, 2012
20. C. Joao, “Ocean Wave energy”, Springer-Verlag, 2008
21. Compactrio, Retrieved May 5, 2012 from <http://www.ni.com/compactrio/whatis/>
22. NI-9205, Retrieved May 5, 2012 from <http://sine.ni.com/nips/>

cds/view/p/lang/en/nid/208800

23. Technical Data Sheet for PR SERIES, Autonics
24. Technical Data Sheet for MP5W, Autonics
25. Technical Data Sheet for Pitot Tube Type L, KIMO
26. Technical Data Sheet for PSAN SERIES, Autonics
27. Technical Data Sheet for UM30-2 Ultra Sensors, SICK
28. Significant wave height , Retrieved May 5, 2012 from <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=379967>
29. State machine, Retrieved May 5, 2012 from [http://labviewwiki.org/State\\_Machine](http://labviewwiki.org/State_Machine)
30. 이중우, 해양에너지자원공학, 2010
31. Resonance, Retrieved May 5, 2012 from <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=715660>
32. Wells turbine, Retrieved May 5, 2012 from <http://owcwaveenergy.weebly.com/generating-power.html>
33. Cross-flow water turbine, Retrieved May 5, 2012 from <http://www.pumpfundamentals.com/micro-hydro-banki.htm>
33. Ellipticity, Retrieved May 5, 2012 from <http://terms.naver.com/entry.nhn?docId=981560&mobile&categoryId=1294>

## 감사의 글

지난 석사과정 2년 동안 도움을 주신 분들 덕분에 지금 이 순간이 있다고 생각하며 깊은 감사의 인사를 드립니다. 먼저 대학원에서 다양한 경험을 쌓을 수 있도록 도와주시고, 학문적으로 미숙한 저의 공학 석사학위논문 수어를 위하여 본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 격려로 이끌어주신 오진석 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 논문 심사 과정에서 아낌없는 지도와 가르침을 주신 소명옥 교수님, 항상 밝은 웃음으로 격려해주신 유희한 교수님, 매 학기마다 열정적으로 강의를 해주신 김성환 교수님, 이상태 교수님 정병건 교수님께 진심으로 감사드립니다.

후배들을 위하여 진심으로 걱정하고 바른 길로 이끌어주신 준호형, 어려운 일을 하나씩 풀어가는 방법을 보여준 관준 선배, 모형실험 전 과정에 참여하여 자신의 일처럼 도와준 수영이, 학교생활에서 좋은 추억과 보람을 함께 나눈 도영이, 힘들었던 순간에도 늘 웃으며 도와준 성영이, 함께 입학하여 대학원 생활에 활력을 준 지윤이, 실험장치 설계 및 설치에 도움을 준 훈이, 논문 교정 및 데이터 분석에 도움을 준 현석이에게 감사의 마음을 전합니다. 또한 방학 중 교재편집에 함께 참여했던 재연이, 영민이, 영미, 그리고 연구생 정현이, 세라, 기호, 현석이, 미진이에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 아울러 선배님으로서 많은 관심과 조언을 주셨던 선호형, 재현이형, 연형이형, 훈석이형, 종호형, 용주형, 연구실에 아낌없는 지원을 해주신 함연재 사장님, 양향권 사장님, 유대완 님, 이창노 님, 류승현 님과 그리고 모형실험에 도움을 주신 구성필 님, 차영진 님께 감사의 인사를 드립니다. 앞으로 하고자 하는 분야에서 좋은 성과를 거두시길 바랍니다.

저에게 있어 둘도 없는 친구인 도연이, 동건이, 봉혁이, 성우, 기혁이와 검양이, 그리고 일일이 언급을 하지 못했지만 그 동안 저를 아끼고 사랑해주신 모든 분들께 다시 한 번 감사의 인사를 드립니다.

마지막으로 항상 사랑으로 키워주시고 부족한 자식을 믿어주신 부모님께 감사의 말씀을 드리며, 매사에 최선을 다하고, 주위를 배려할 줄 아는 사람으로 성장하도록 노력하겠습니다.

2012.07.07

