

# 전동기-발전기 실험장치 (Motor-Generator Set)를 이용한 조류발전 시스템의 특성 분석

안원영\*, 임형태, 이석현\*\*, 김근수, 조철희

## Analysis of the Characteristics of the Tidal Current Power Generation System Using Motor-Generator Set

Won-Young An\*, Hyung-Tack Lim, Seok-Hyun Lee\*\*, Gun-Su Kim and Chul-Hee Jo

### Abstract

In order to analyze the characteristics of tidal current power generation system, we measured output power in M-G Set (Motor-Generator Set) and MATLAB/Simulink. We installed M-G Set (Motor-Generator Set) and did a simulation using MATLAB/Simulink. The simulation consisted of the tidal current turbine, PMSG, converter, and three-phase PWM inverter. Also, the speed control of the generator was performed using machine side converter. And we measured output voltage, current, power of the generator and the output power of three-phase PWM inverter.

### Key words

M-G Set, Tidal current power generation(조류발전), PMSG(영구자석 동기발전기), MATLAB/Simulink

(접수일 2013. 7. 30, 수정일 2013. 9. 5, 게재확정일 2013. 12. 10)

\* 인하대학교 전기공학과 (Department of Electrical Engineering, Inha University)

■ E-mail : shuran1004@naver.com ■ Tel : (032)860-7407

\*\* 교신저자, 인하대학교 전기공학부 (Department of Electrical Engineering, Inha University)

■ E-mail : plasma@inha.ac.kr ■ Tel : (032)860-7392 ■ Fax : (032)863-5822

### Nomenclature

$C_p$  : power coefficient

$\lambda$  : TSR

$V$  : stream velocity, m/s

PMSG : Permanent Magnet Synchronous Generator

TSR : Tip Speed Ratio

### subscript

M-G Set : Motor-Generator Set

## 1. 서론

최근 지구 온난화를 유발하는 온실가스 배출규제협약인 유엔 기후변화협약의 발효로 청정에너지의 개발과 화석연료의

고갈에 따른 대체에너지의 개발이 요구되고 있다. 이와 같이 화석연료 공급의 한계 및 사용에 따른 심각한 환경문제 유발로 세계는 지속 가능한 대체에너지 개발에 총력을 기울이고 있으며, 특히 한국은 97% 이상의 에너지를 수입에 의존하고, 유가 상승에 따른 국제수지 악화 및 환경오염 등의 문제로 대체에너지의 개발이 매우 시급한 실정이다.<sup>(1)</sup>

조류발전은 친환경적이고 안전한 신재생 에너지 자원으로 다른 신재생 에너지 자원을 사용한 발전시스템에 비하여 에너지 밀도가 높아 효율이 좋고 안정적인 발전 시스템이다. 조류발전은 해수의 유동으로 터빈이나 로터를 구동시켰을 때 발생하는 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 에너지를 생산하는 기술로 유속이 빠른 지역에 적용하는데 삼면이 바다인 우리나라의 발전 실정에 적합하다고 할 수 있다.<sup>(2)</sup>

본 논문에서는 M-G Set(Motor-Generator Set)를 구축하여 조류발전 시스템의 성능 및 특성을 효율적으로 모의실험을 하였다. 또한 MATLAB/Simulink를 이용하여 조류발전 시스템을 모델링하였고 발전기 속도제어를 통해 발전기에서 출력되는 전압과 전류, 전력과 인버터에서 출력되는 전압, 전류 출력 특성을 확인하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 조류발전 시스템

조류발전 시스템에서 출력계수란 유속이 가지고 있는 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미한다. 따라서 출력계수는 유속에 대한 블레이드의 회전속도 비율인 주속비(TSR)  $\lambda$ 에 따라 변하게 된다. 블레이드의 출력계수는 식 (3)과 같이 근사화하여 나타낼 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$C_p(\lambda) = a_3\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_1\lambda + a_0 \quad (1)$$

여기서,  $a_0 = -0.0058634$ ,  $a_1 = 0.1473530$

$a_2 = -0.019876$ ,  $a_3 = 0.0006518$ 이다. 또한 주속비  $\lambda$ 는 식 (4)와 같이 나타낸다.

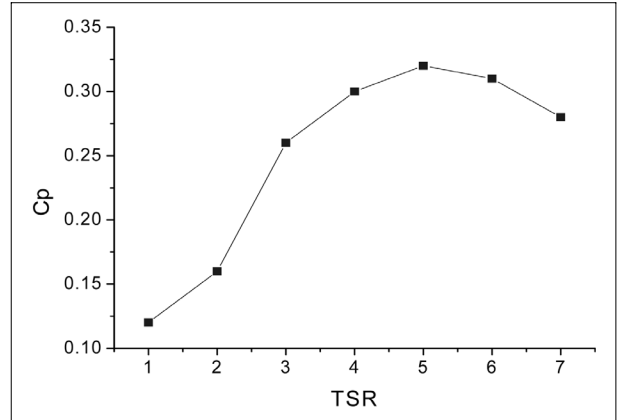


Fig. 1 Cp and TSR Characteristic of Tidal Current Power System

$$\lambda = \frac{w_{blade} R_{blade}}{V_{water}} \quad (2)$$

블레이드의 회전면적과 유속 밀도가 일정하면 출력 계수 ( $C_p$ )는 Fig. 1과 같이 주속비  $\lambda$ 가  $\lambda_{opt}$  값으로 갖는 속도를 가질 때 최대 값을 갖게 된다.<sup>(4)</sup>

조류발전에서 블레이드는 유체의 유동에너지를 회전에너지로 변환하여 발전기에 공급하는 역할을 한다. 블레이드의 기계적인 에너지인  $P_{blade}$ 는 출력계수와 주속비를 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(5)</sup>

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V_{water}^3 C_p(\lambda) [W] \quad (3)$$

여기서,  $P_{blade}$ 는 터빈에 포획되는 전력[W], A는 회전 단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $V_{water}$ 는 유속[m/s],  $\lambda$ 는 주속비,  $C_p$ 는 출력계수이다. 유속의 변화에 따라 회전 속도에서 블레이드가 입력할 수 있는 토크  $T_{blade}$ 는 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{w_{blade}} = \frac{1}{2} A \rho V_{water}^3 \frac{C_p}{w_{blade}} [N.m] \quad (4)$$

### 2.2 영구자석 동기기 모델링

영구자석 동기기는 회전자에 자속발생을 위한 여자 권선이

없으므로 이로 인한 손실이 없어 효율이 좋고 고출력 밀도를 가지고 있어 전동기 무게에 대한 출력 토크 비가 크고 속응성이 좋은 장점을 갖고 있다.

### 2.2.1 고정자 전압방정식

Fig. 2는 영구자석 동기기의 d-q축 등가회로를 나타낸 것이다. 영구자석 동기기의 고정자 전압방정식을 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} - \omega \lambda_{qs} \\ V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.3 발전기 측 컨버터 제어기

최적의 운전 점에서 제어 지령치를 이용하여 만들어진 속도 지령치를 사용하여 발전기는 속도제어, 전류 제어가 된다. 제어시의 최적파워를 내는 발전기의 속도지령과 발전기의 실제 속도의 오차는 PI(비례적분)제어기를 거쳐 발전기 측 컨버터의 q축 전류를 지령치에 맞도록 제어하여 최대 토크가 나오도록 제어하게 된다. 발전기 측 제어기에 관한 블록선도는

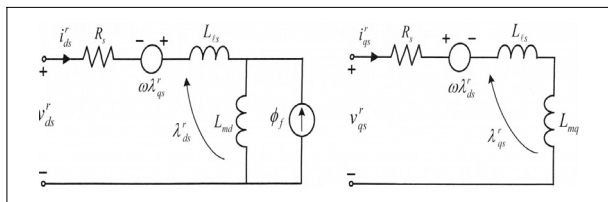


Fig. 2 d-q Equivalent Circuit of PMSM

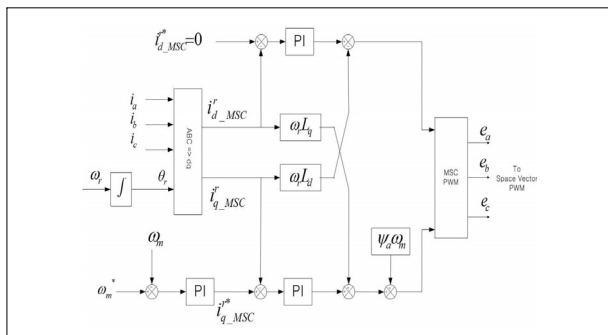


Fig. 3 Generator Side Converter Controller

Fig. 3과 같다.<sup>(7)</sup>

## 3. M-G Simulator

일반적으로 풍력 또는 조류 발전과 같이 블레이드를 사용하여 회전하는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 시스템을 모의실험하기 위해 블레이드를 회전자로 대체하여 구성한다. 이는 블레이드의 회전 속도를 가변 시킬 수 있을 뿐만 아니라 공간적인 이점으로 인해 회전을 채택하며 일반적으로 유도 전동기가 사용된다. 회전자로부터 발생하는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 장치로 발전기가 사용된다. 여기서 발전기는 회전자로 사용된 전동기 이외의 또 다른 전동기로 구현할 수 있고, 일반적인 형태로 전동기와 발전기를 결합하여 구성된 모의실험 장치를 Motor-Generator Set이라 한다.<sup>(8)</sup>

Fig. 4는 농형 유도전동기와 영구자석형 동기발전기를 기본으로 하는 대학 실험실과 같이 규모가 작은 곳에서 적은 비용으로 구축하기에 적당한 M-G Set(Motor-Generator Set)을 나타낸 것이다.

M-G Simulator를 구동하였을 때 토크에 따른 출력 변화

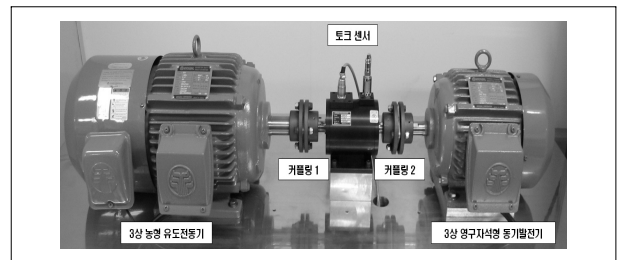


Fig. 4 M-G Set for Tidal Current Power Generation

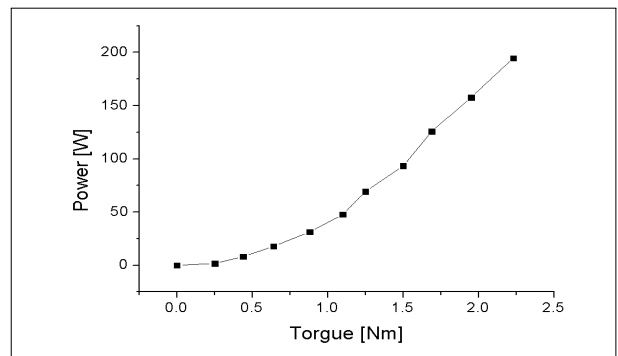


Fig. 5 Generator Output Power of M-G Simulator

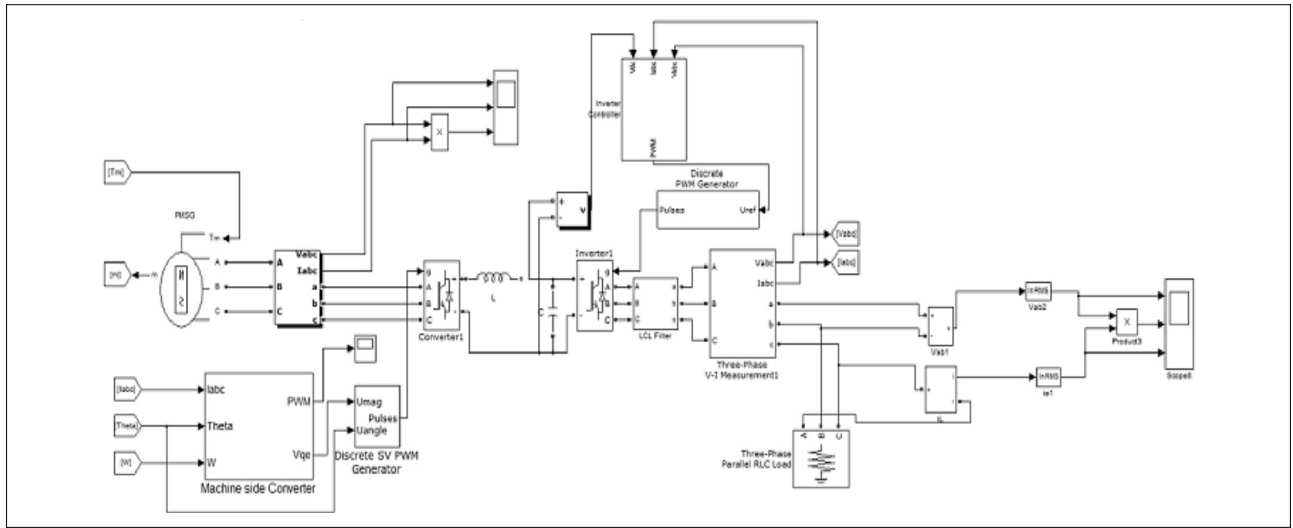


Fig. 6 Tidal Current Power Generation System Modeling

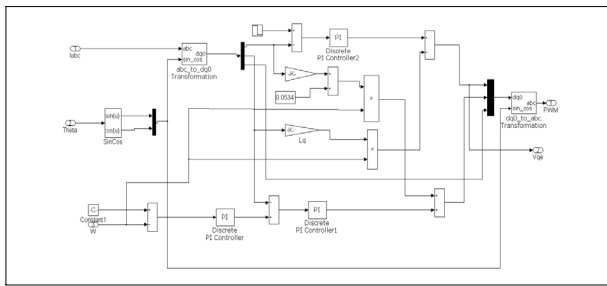


Fig. 7 Machine Side Converter

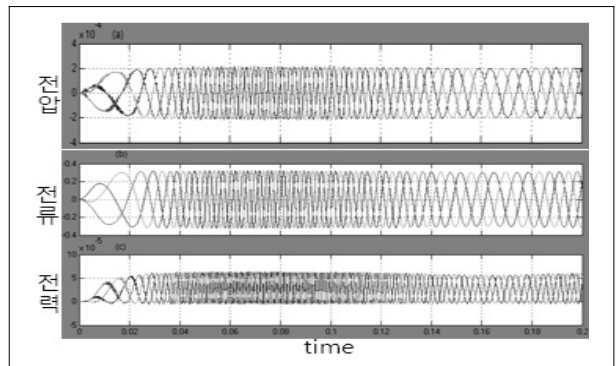


Fig. 8 Three Phase Current, Voltage, Power of Generator

는 Fig. 5와 같다. 전동기에서 출력되는 토크가 증가함에 따라 발전기에서 출력되는 전력도 증가하는 것을 볼 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션

조류발전 시스템의 특성을 분석하기 위해서 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행 하였다. 조류발전 시스템은 크게 조류 터빈과 영구자석 동기발전기, 컨버터, PWM 인버터로 구성된다. 이를 바탕으로 조류발전 시스템의 모델링한 것을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 7은 속도 제어를 위한 발전기 측 컨버터를 모델링 한 것이다. Fig. 3에서 나타낸 블록 다이어그램을 MATLAB/Simulink를 이용하여 모델링하였다. d축 전류를 0으로, q축 전류를 지령치와 비교하여 PI제어기를 통해 오차를 줄이고

최대 토크가 나오도록 제어하게 된다.

조류터빈에 유속 입력을 넣으면 토크가 출력되고, 이 토크가 발전기의 입력이 되어 발전기가 동작하게 되면 0.02초 후에 일정한 출력이 나오게 되고 시간이 흐른 뒤에 주파수가 변동하게 되는 것을 Fig. 8에서 볼 수 있다. 여기서, (a)는 발전기에서 출력되는 3상 전류, (b)는 3상 전압, (c)는 전력을 나타낸다. M-G Set은 전동기 구동 인버터를 통해 전압을 인가하여 토크가 증가할수록 출력이 증가한다. 하지만 Fig. 8의 결과는 전동기 대신에 조류 터빈을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였고 실험 조건이 틀려 M-G Set 실험결과 값과 차이가 발생한다. 조류터빈에 유속을 인가하면 토크 값이 발생한다. 이 토크 값에 의하여 영구자석 동기발전기가 동작하게 된다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 출력되는 전압과 전류 값이 작지만 3상 출력이

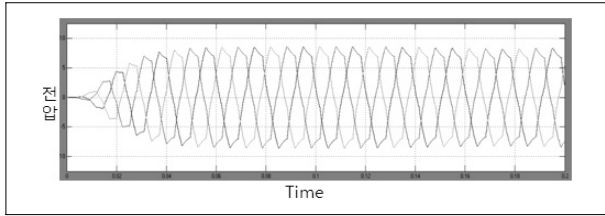


Fig. 9 Output Voltage of Three Phase PWM Inverter

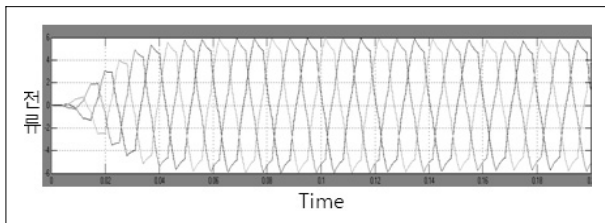


Fig. 10 Output Current of Three Phase PWM Inverter

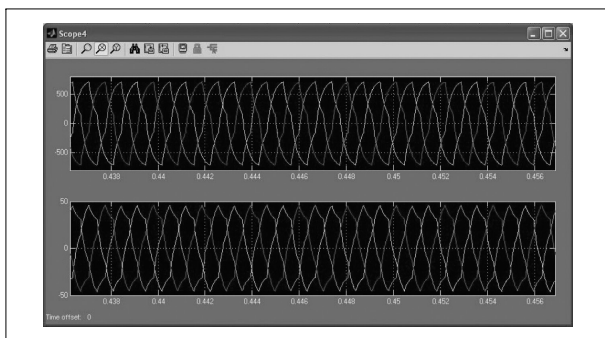


Fig. 11 Load end-side voltage and line current waveform

나오므로 시뮬레이션이 정상적으로 구동되었다고 생각된다.

Fig. 9와 10은 3상 PWM 인버터에서 출력되는 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 발전기에서 출력되는 전압과 전류는 3상 다이오드 정류기에서 AC에서 DC로 변환되고 이 전압과 전류가 PWM Inverter를 통해 다시 AC로 변환되어 그림과 같이 출력된다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 발전기에서 출력되는 전류와 전압, 전력의 주파수가 시간에 따라 일정하지 않는데 PWM 인버터를 통해 주파수가 일정해지고 전압과 전류 값도 일정하게 나오는 것으로 보아 PWM제어가 정상적으로 작동하는 것을 알 수 있다. PWM인버터는 펄스폭을 제어하여 주파수를 일정하게 제어하고 전압을 조정해주는 역할을 한다. Fig. 9와 10에서 보는 바와 같이 주파수가 일정하게 제어되는 것을 보아 PWM 제어가 정상적으로 작동한다고 생각된다.

Fig. 11은 References [6]의 Fig. 14를 실험결과와 비교해 보기 위해 발췌한 것이다. Fig. 9, 10과 비교해 보면 파형과

위상이 비슷하게 출력되는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 조류발전 시스템의 특성을 분석하기 위해서 대학 실험실 같이 규모가 작은 곳에서 모의실험을 할 수 있는 장치인 M-G Set을 구축하였고 토크에 따른 출력의 변화를 측정하였을 때 토크가 증가함에 따라 출력도 증가하게 되는 것을 보았다. 또한 MATLAB/Simulink를 사용하여 조류발전 시스템과 발전기 속도제어를 위한 발전기 측 컨버터를 모델링하여 시뮬레이션을 수행 하였을 때 발전기에서 출력되는 전압, 전류는 시간이 지남에 따라 변하여 불안정하게 되지만 PWM인버터를 통하여 출력되는 3상 전압과 전류, 주파수가 일정하게 나오는 것을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 국토해양부의 “해양에너지 전문인력 양성사업” 과 산업통상자원부의 해양플랜트 특성화 대학 그리고 인하대학교의 지원으로 수행된 연구결과입니다.

## References

- [1] Chang-Jo Yang, “A Study on the Design of Tidal Current Farm in the Bunamgun-do”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 19, pp. 85-92, 2013.
- [2] Cheon-Kyu Kim, Jae-Doo Na, Sang-Wook Kim, Jung-Soo Choi, Eul-Jae Lee, Kyu-Min Jo, Jae-Hwa Shin, Young-Seok Kim, “The MPPT Control Method of The seaflow Generation by Using DC-DC Converter”, KIEE Summer Conference, PP984-985, 2008.
- [3] Doo-Young Lee, Dong-Jin Yun, Jong-Kyou Jeong, Seung-Chul Yang, Byung-Moon Han, Seung-Ho Song, “Developmenet of Hardware Simulator for PMSG Wind Power System”, Trans. KIEE, Vol. 56, pp. 951-958, 2008.

- [4] Won-Young An, Seok-Hyun Lee, Gun-Su Kim, Kang-Hee Lee, Chul-Hee Jo, "Analysis of the Characteristics of the Tidal Current Power Generation System Using PMSG and Water Tunnel", *New & Renewable Energy*, Vol. 9, pp. 44-49, 2013.
- [5] Hae-Seon Jung, Joon-Min Lee, Jae-Du Na, Young-Suk Kim, "The MPPT Control Method of 100kW High Efficiency Seaflow Generation", *KIEE Fall Conference*, pp. 196-199, 2009.
- [6] Janardan Gupta, Ashwani Kumar, 2012, "Fixed Pitch Wind Turbine-Based Permanent Magnet Synchronous Machine Model for Wind Energy Conversion System",

*Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2, pp. 52-62.

- [7] Ashwani Kumar, K. S. Sandhu, S. P. Jain, P. Sharath Kumar, "Modeling and Control of Micro-Turbine Based Distributed Generation System", *International Journal of Circuit, Systems and Signal Processing*, Vol. 3, pp. 65-72, 2009.
- [8] Joo-Il Hong, Seok-Hyun Lee, Won-Young An, Chul-Hee Jo, "Development of a Tidal Current Power Simulator based on LabVIEW", *KIEE Summer Conference*, pp. 1219-1220, 2010.

**안 원 영**



2010년 인하대학교 전기공학과 공학사  
2013년 인하대학교 전기공학과 공학석사

현재 인하대학교 해양에너지환경 융합기술연구소 연구원  
(E-mail : shuran1004@naver.com)

**임 형택**



2011년 인하대학교 전기공학과 공학사

현재 인하대학교 전기공학과 공학석사과정  
(E-mail : limht1039@naver.com)

**이 석 현**



1985년 서울대학교 전기공학과 공학사  
1987년 서울대학교 전기공학과 공학석사  
1993년 서울대학교 대학원 전기학과 공학박사

현재 인하대학교 전기공학부 교수  
(E-mail : plasma@inha.ac.kr)

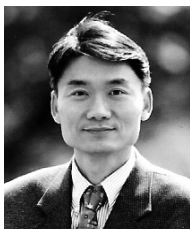
**김 근 수**



2000년 인하대학교 전기공학과 공학사  
2002년 인하대학교 전기공학과 공학석사  
2009년 인하대학교 전기공학과 공학박사

현재 영진전문대학 전자정보통신계열 교수  
(E-mail : kgs13152@hotmail.com)

**조 철 희**



1984년 인하대학교 조선공학과 공학사  
1985년 미국 Steven Institute of Technology  
해양공학과 공학석사  
1991년 미국 Texas A&M University 해양공학과  
공학박사

현재 인하대학교 조선해양공학과 교수  
(E-mail : chjo@inha.ac.kr)