

하이브리드 커패시터를 적용한 소형 태양광 전원장치

The Small Photovoltaic power supply using Hybrid Supercapacitor

김 태 엽^{*★}

Tae-Yeop Kim^{*★}

Abstract

The stand-alone photovoltaic power systems are widely used for lighting equipment and CCTV. In order for these devices to be competitive, the life of power storage devices such as batteries is very important. The characteristic Hybrid supercapacitor is the high power density and long life. We have proposed a stand-alone photovoltaic power system that uses hybrid supercapacitor. The charge and discharge characteristics and the internal resistance of the hybrid capacitor were measured to configure the power converter. A stable maximum output point tracking control algorithm is proposed even with the change in solar radiation. In order to verify the validity of the proposed system, a prototype was fabricated and tested using a 18W hybrid capacitor and a 10W solar cell.

요 약

소형 독립형 태양광 전원장치는 조명장치, CCTV 등에 많이 활용되고 있다. 이러한 장치가 경쟁력을 가지기 위해서는 배터리와 같은 전력저장장치 수명이 매우 중요하다. 하이브리드 커패시터는 고밀도와 장수명의 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 하이브리드 커패시터를 이용한 독립형 태양광 전원장치를 제안한다. 전력변환장치의 구성하기 위해 하이브리드 커패시터의 충방전 특성 및 내부저항을 측정하였다. 일사량 변화에도 안정적인 최대 출력점 추종제어 알고리즘을 제시하였다. 제시한 시스템의 타당성을 검증하기 위해 18W의 하이브리드 커패시터와 10W태양광 전지를 이용하여 시제품을 제작하고 실험하였다.

Key words : stand-alone photovoltaic power system, hybrid capacitor, internal resistor, MPPT, solar cell

1. 서론

독립형 태양광 전원장치는 상용전원의 사용이 어려운 분야에 많이 활용되어 왔다. 인테리어 조명, 표지판, 무선 IP 카메라 등의 활용분야에서는 소모

전력량이 수~수십 Wh로 적어서 소용량 독립형 태양광 전원장치가 활용될 수 있다^[1].

에너지 저장원으로는 연축전지, 니켈수소, 리튬이온 배터리 등이 많이 사용되고 있고, 저가격, 높은 에너지 밀도 특징을 가지고 있다. 하지만 충방전

* Dept. of Electrical Eng., Changwon Nat'l University

★ Corresponding author

E-mail : drkimty@naver.com, Tel : +82-267-1146

Manuscript received Sep. 4, 2019; revised Sep. 18, 2019; accepted Sep. 19, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사이클 및 수명이 짧아 유지보수가 필요한 단점을 가지고 있다.

이에 비해 슈퍼 커패시터는 반영구적 수명과 폭발의 위험성이 없는 장점을 가진다. 하지만 낮은 전력 밀도와 높은 가격이 단점이다.

슈퍼커패시터는 동작 원리에 따라 전기이중층(EDLC), 의사(Pseudo), 하이브리드(Hybrid) 커패시터가 있다. 하이브리드 커패시터는 전기이중층 커패시터에 비해 높은 전력밀도를 가지고 있다^{[2][3]}.

본 논문에서는 에너지 저장원으로 리튬 티탄산산화물(Li₄Ti₅O₁₂)을 음극물질로 이용한 리튬 티타늄계 금속 산화물 하이브리드 슈퍼 커패시터를 사용하였다. 이는 전기 이중층 슈퍼 커패시터(EDLC)에 비해 체적당 용량이 약 2.5배로 에너지 밀도가 높다. 사용한 커패시터의 용량은 2.7V, 9000F, 2개를 직렬로 사용하여 약 18Wh의 저장용량을 구현하였다. 적용한 커패시터와 유사 사양의 리튬이온 배터리와의 가격 차이는 약 3배로 고가이나 유지보수 비용이 발생하지 않는 장점을 가진다.

하이브리드 커패시터의 충방전 특성과 내부저항을 측정하여 충전회로 개발에 사용하였다. 일사량 변화에도 안정적인 추종 성능을 가지는 최대 출력점 추종 제어 알고리즘을 제시하였다. 제시한 시스템의 검증을 위해 시제품을 제작하고 성능을 시험하였다.

II. 본론

1. 하이브리드 슈퍼 커패시터 특성

가. 기대 수명

제조사 사양을 기준으로 일일 1회의 충방전을 가정할 때 충방전 1,000회를 가지는 리튬 배터리의 기대수명은 2.7년이며, 50,000회를 가지는 하이브리드 커패시터의 기대수명은 137년으로 계산된다. 따라서 하이브리드 커패시터는 충방전 횟수가 일일 10회 이상의 적용 분야에서 수명의 장점이 극대화될 수 있다.

나. 충전 특성

EDLC와 하이브리드 커패시터 충방전 특성곡선은 그림 1과 같다. EDLC의 충방전 특성은 일정한 기울기를 가지며, 이는 커패시터 용량에 의해 결정

되고, EDLC의 충방전 특성은 식(1)과 같다.

$$V_c = \frac{1}{C} \int I dt \tag{1}$$

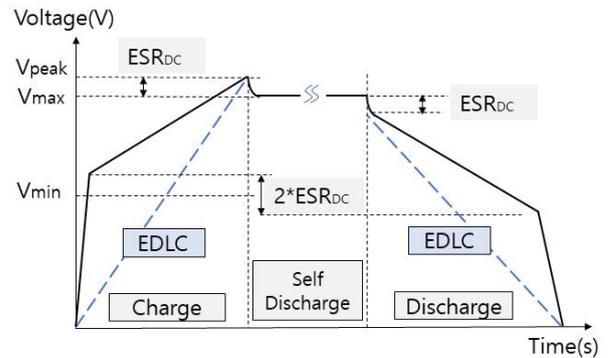


Fig. 1. Charge and discharge characteristic of Hybrid capacitor and EDLC.

그림 1. 하이브리드 커패시터 및 EDLC 충방전 특성

하이브리드 커패시터의 충방전 특성은 배터리 충방전 특성과 유사하며 V_{min} 을 기준으로 전압 상승 기울기가 다르다. 따라서 식(1)을 적용하기 어렵다. 커패시터 내부 저항(ESR_{DC})에 의하여 충방전 전류에 따른 전압변동(ΔV_{ESR})을 발생하게 되며, 충방전 효율에 영향을 준다.

적용한 커패시터의 충전특성을 측정한 실험 결과는 그림 2와 같다. 이때 충전전류는 2A(0.5C)이다.

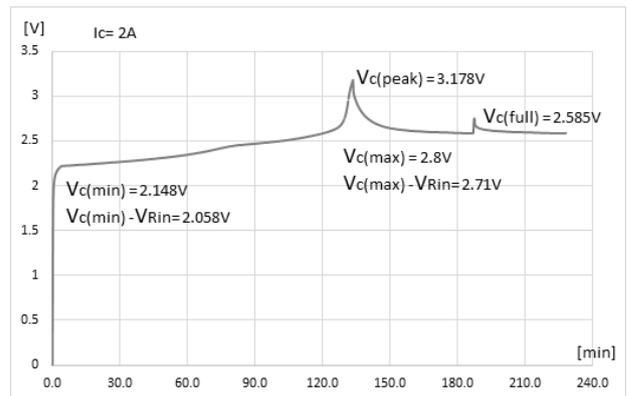


Fig. 2. Charge characteristic of Hybrid capacitor at 2A.

그림 2. 하이브리드 커패시터 충전 특성(2A, 0.5C)

초기 충전과정에서 전압이 급격히 상승하며, 커패시터 단자전압(V_c)가 약 2.15V에서 전압 상승 기울기가 감소하기 시작한다. 단자전압이 약 2.8V에서 전압 상승 기울기가 급격히 상승하며, 커패시터 만충전압을 검출하기 위해 약 5분간 과충전을 지속

하였고, 이때 피크전압은 3.18V이다. 전압의 안정화를 위해 약 1시간의 휴지 기간후 측정된 만충 전압은 2.585V로 측정되었다. 이후 다시 30초간 충전하였으며, 동일한 만충 전압이 측정되었다.

정전류 충전시 만충조건은 단자전압의 상승 변화율($\Delta V_c/min$)을 기준으로 만충상태를 검출할 수 있다. 그림 2의 충전특성을 상승 변화율로 표현하면 그림 3과 같다.

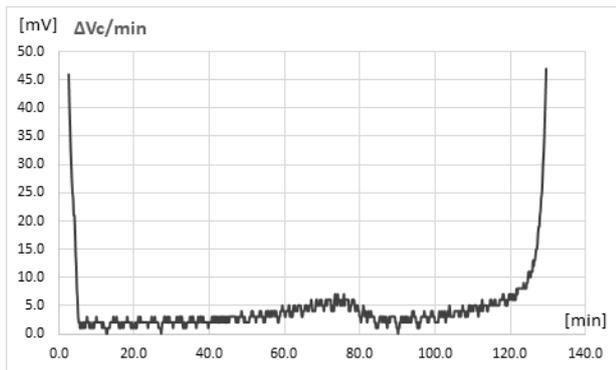


Fig. 3. $\Delta V_c/min$ characteristic of Hybrid capacitor at 2A.
그림 3. 하이브리드 커패시터 $\Delta V_c/min$ 특성(2A, 0.5C)

다. 커패시터 등가 직렬 저항

커패시터 내부저항에 의한 전압의 변동은 식(2)와 같다.

$$\Delta V_{ESR_{DC}} = ESR_{DC} \cdot I_{discharge} \tag{2}$$

배터리 내부저항을 측정하기 위해 만충상태에서 8A(2C)로 방전 및 개방을 시험하였으며, 결과는 그림 4(a)와 같고, 식(2)을 적용한 내부저항 추정값은 그림 4(b)와 같다.

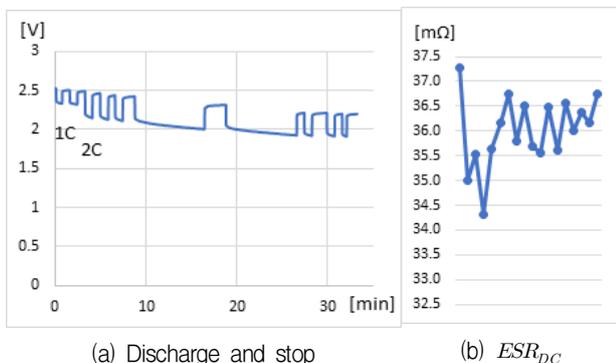


Fig. 4. Estimation of Internal Resistor.
그림 4. 내부저항 추정값

방전 및 개방상태의 전환 시 전압변화량 0~80% 소요 시간은 약 3~7초가 이었으며, 80~95%는 약 30~60초의 시간지연이 발생하였다. 내부 저항의 추정을 위해 사용된 전압변화량은 0~80%를 기준으로 계산하였다.

측정된 결과를 기준으로 식(2)를 적용하여 추정된 커패시터 내부 저항은 그림 4(b)와 같으며, 측정 결과는 36mΩ이다.

단자전압 2.1V 이하에서 개방/부하에 따른 전압 변동($\Delta V_{ESR_{DC}}$)은 그림 5와 같다. 그림 5에서 개방전압은 1.95~2.15V로 큰 변화가 없으나, 방전에 따라 부하시 전압강하가 증가하는 것이 관찰되었다.

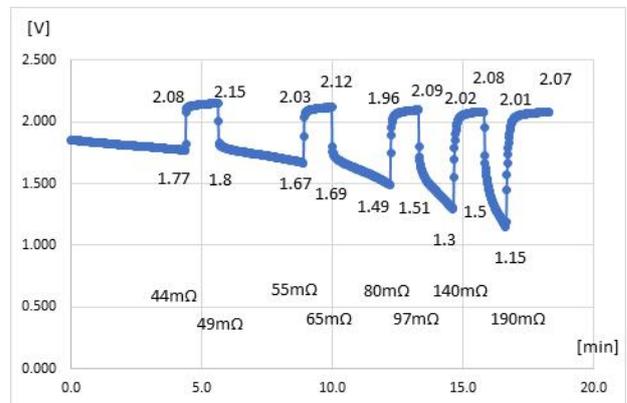


Fig. 5. Estimation of Internal Resistor under 2.1V.
그림 5. 2.1V 이하에서 내부저항 추정값

그림 5에서 커패시터 저전압 영역에서 부하에 의한 단자전압 감소가 크게 발생한다. 이러한 영역을 사용하기 위해서 안정적인 전압을 부하에 공급하기 위해서는 부가적인 전원장치가 필요하다.

위와 유사한 방식으로 커패시터 충전시 내부저항은 약 45~60mΩ으로 측정되었으며, 방전시 내부저항 추정값과 약 10mΩ의 차이가 발생하였다. 이는 내부저항, 화학 반응 등의 시간지연에 따른 것으로 예상된다.

라. 저장 에너지 및 충방전 효율

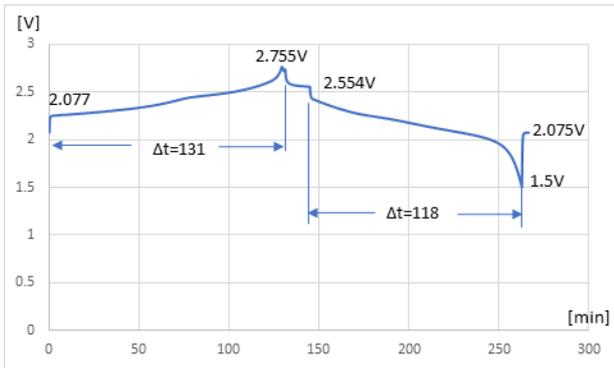
커패시터의 저장 에너지는 식(3)과 같다.

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \tag{3}$$

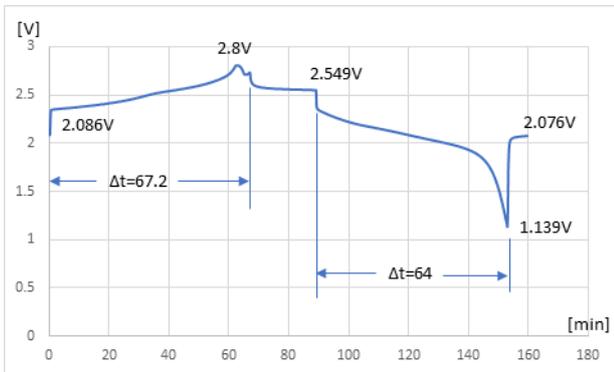
사용된 커패시터의 용량은 9000F이며, 정격전압은 2.7V이다. 이는 전력으로 환산하면, 9.1W/h로

계산된다. 하이브리드 커패시터는 단자전압은 그림 1과 같고, 용량 및 전압의 관계가 비선형적인 특성을 가지고 있어 식(3)이 적용할 수 없다. 또한 단자전압으로 충전 잔량을 계산할 수 없다.

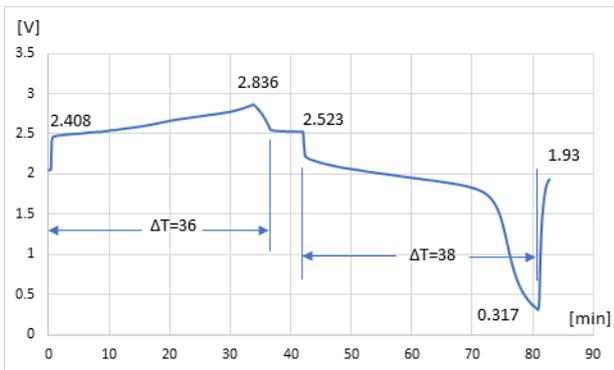
커패시터의 저장 에너지를 실험을 통하여 검증하였다. 충전 전류는 2, 4, 8A 조건에서 방전은 1, 0.5, 0.25Ω의 조건에서 실험을 진행하였으며, 결과는 그림 6과 같다.



(a) Charge and discharge characteristic at 2A(0.5C)



(b) Charge and discharge characteristic at 4A(1C)



(a) Charge and discharge characteristic at 8A(2C)

Fig. 6. Charge and discharge characteristic at 2, 4, 8A. 그림 6. 충전 특성 실험(2, 4, 8A)

그림 6의 충전 특성 실험 결과를 이용하여 충전 효율을 계산하면 표 1과 같다.

Table 1. Efficiency of charge and discharge.

표 1. 커패시터 충전 효율

	Charge[W]	Discharge[W]	Efficiency[%]
2A(0.5C)	10.43	9.08	87.0
4A(1C)	11.18	8.83	79.0
8A(2C)	12.21	8.50	69.6

2. 태양광 MPPT 제어

태양전지 최대 출력점 추종 제어기법은 전력비교법(Perturb and observe)과 도체 증분법(Incremental Conductance) 방법이 많이 사용되고 있다^[4].

전력비교법은 태양전지 출력 전압을 변동시키고 이에 따른 전력을 비교하여 최대출력점을 추종하는 방법이다.

도체 증분법은 식(4)을 사용하며, 최대 출력점에서 $G = \Delta P / \Delta V = 0$ 이 되는 특징을 이용하는 방법이다.

$$G = \frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I \cdot \frac{dV}{dV} + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} \quad (4)$$

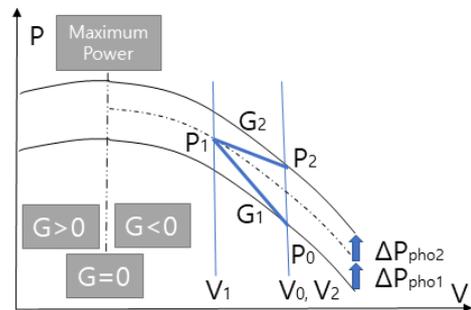


Fig. 7. Characteristic of solar cell at incremental conductance and irradiance variance.

그림 7. 도체 증분법과 일사량 변화에 따른 태양전지 특성

그림 7은 도체증분법의 원리 및 일사량 변화시 최대 출력점 추종제어가 실패 원인을 설명하고 있다. 최대 출력점 추종과정에서 일사량 변동에 따른 전력변동분(ΔP_{pho})이 발생하게 되면 측정된 G_1 의 값은 실제보다 크게 측정되며, G_2 의 값은 실제보다 작게 측정된다.

이러한 오류를 감소시키기 위해 논문에서 제시하는 방법은 다음과 같다.

그림 7에서 제어주기 0, 1, 2에서 태양전지 출력은 각각 P_0, P_1, P_2 이다. 일사량 변화에 의한 태양전지 전력변화량(ΔP_{pho})에 의한 영향에 대한 전력변화량(G_1, G_2)은 식(5)와 같다.

$$G_1 = \frac{P_1 - P_0 + \Delta P_{pho}}{V_1 - V_0} \tag{5}$$

$$G_2 = \frac{P_2 - P_1 + \Delta P_{pho}}{V_2 - V_1}$$

$V_0 = V_2$ 이고 $\Delta P_{pho1} = \Delta P_{pho2}$ 이면 식(5)는 식(6)과 같다.

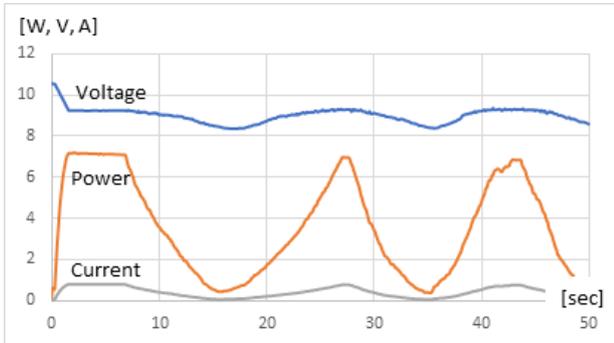
$$G_1 = \frac{P_1 - P_0 + \Delta P_{pho}}{V_1 - V_0} \tag{6}$$

$$G_2 = \frac{P_1 - P_0 - \Delta P_{pho}}{V_1 - V_0}$$

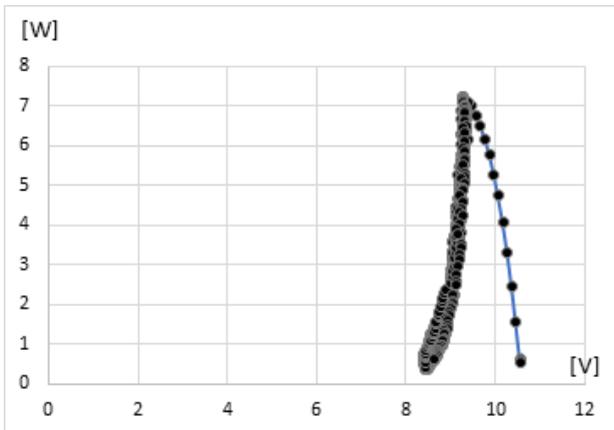
식(6)의 평균값은 식(7)과 같고, 일사량 증가에 따른 전력변동분(ΔP_{pho})이 제거됨을 나타낸다.

$$\frac{(G_2 + G_1)}{2} = \frac{P_1 - P_0}{V_1 - V_0} \tag{7}$$

식(7)을 이용하여 최대 출력점 추종제어를 구현한 실험 결과는 그림 8과 같으며 일사량 변화 시에도 최대 출력점을 안정적으로 추종함을 보여준다.



(a) Voltage, current and power at irradiation variance



(b) Power vs Voltage at irradiation variance

Fig. 8. Experiment results of MPPT.

그림 8. 최대출력점 추종제어 실험결과

본 논문에서 제시한 시스템을 검증하기 위해서 사용한 태양전지용량은 10W이며, 9000F 2.7V 커패시터 2개를 직렬로 구성하여 약 18Wh로 구현하였다. 제작된 시제품은 그림 9와 같다.

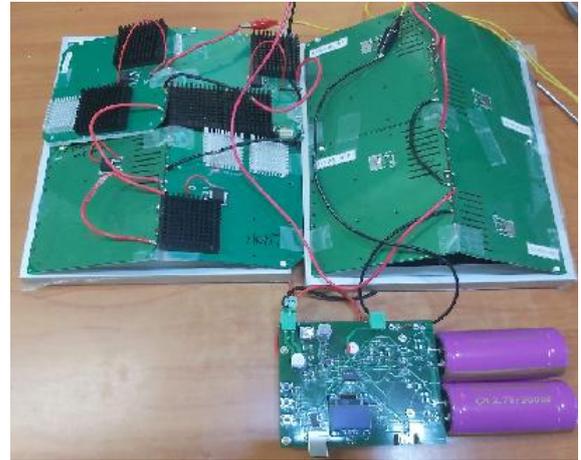


Fig. 9. Proposed photovoltaic power supply used hybrid capacitor.

그림 9. 태양전지 및 하이브리드 커패시터를 이용한 전원장치 시제품

III. 결론

본 논문은 에너지 저장장치로 하이브리드 커패시터를 사용하고 전력원으로 태양전지를 이용한 전원 장치에 대하여 연구하였다.

하이브리드 커패시터는 충방전 전압특성이 배터리와 유사하며, 이를 제어하기 위해서 등가회로 모델의 파라미터를 추정하고 이를 제어 알고리즘 구현에 기초로 사용하였다.

일사량 변화에도 안정적인 동작을 보장할 수 있는 태양전지 최대 출력점 추종 알고리즘을 제시하였다.

소형 간판, 조명, CCTV에 적용이 가능한 18W용량의 소형 태양광 전원장치를 제작하였고, 시스템의 동작 및 성능을 실험을 통하여 검증하였다.

References

[1] Baohua Li and Xuesong Pan, Yan-Bing He, "Study of EDLC and its usage in stand alone photovoltaic system," *Advanced Materials Research*, vol.335-336, pp.1368-1375, 2011.

[2] Atsuya Sato, "Taiyo yuden lithim ion capacitors: Adffective EDLC replacement," https://www.yuden.co.jp/include/english/solutions/lic/LIC_White_Paper_Final.pdf

[3] Mahdi Soltani, Jan Ronsmans, Shouji Kakihara, Joris Jaguemont, "Hybrid Battery/Lithium-Ion Capacitor Energy Storage System for a Pure Electric Bus for an Urban Transportation Application," *Applied sciences*, 2018. DOI: 10.3390/app8071176

[4] Tae-Yeop kim, Yon-kyu Lee, Ho-Gyun Ahn, Seung-Kyu Park, "A Novel Maximum Power Point Tracking Control Algorithm for Photovoltaic System," *KIEE*, Vol.51, 2002.

BIOGRAPHY

Tae-Yeop Kim (Member)



1996 : BS degree in Electrical Engineering, Changwon National University.

1998 : MS degree in Electrical Engineering, Changwon National University.

2006 : PhD degree in Electrical Engineering, Changwon National University.

2006~2019 : CEO, Lumipower Corp.

2018~2019 : Adjunct Professor, Chagwon National University.