

## 독립형 태양광 발전 시스템 충전제어기 개발에 관한 연구

오진석† · 콧준호\*

(원고접수일 : 2004년 1월 16일, 심사완료일 : 2004년 7월 29일)

### A Study on the Development of Charging Controller in Stand-Alone PV Power Generation System

Jin-Seok Oh† · Jun-Ho Kwak\*

**Abstract** : This paper describes microprocessor-based control of photovoltaic power conditioning system, where the microprocessor is responsible for control of output power in accordance with the generated array DC power. The microprocessor includes the control algorithm of maximum power point tracking and converter control algorithm. In this power, we have designed a MPPT(Maximum Power Point Tracker) algorithm with environment factors and a PWM(Pulse Width Modulation) algorithm for high efficiency. The controller has been tested in the laboratory with the power conditioner and shows excellent performance.

**Key words** : Solar cell(태양전지), Converter(컨버터), Charge controller(충전제어기), MPPT(최고전력점추종기), PWM(펄스폭변조)

### 1. 서 론

태양전지 어레이를 이용하여 얻은 태양광 전력은 가정용, 해양시설물용, 산업 시설용 등 다양한 분야에 적용할 수 있다. 이러한 태양광 발전 시스템의 출력량은 태양의 일사량과 태양전지 온도 등의 영향에 민감한 특성을 가진다. 그리고 실제 사용되는 일반적인 부하는 교류 부하이므로 직류전류를 생산하는 태양광 시스템으로부터 부하측에 전력을 공급하기 위해서는 인버터 등의 전력변환기가 요구된다.

태양광 발전시스템은 태양광 에너지만을 사용하여 발전하는 독립형 시스템과 타 전력 시스템과 연동하여 사용하는 연계형 시스템으로 나눌 수 있고, 본 연구에서는 해양시설물, 가로등과 같이 특수한 목적을 가지는 곳에 주로 사용되는 즉, 독립형 시스템에 적용이 가능한 마이크로프로세서 기반의 충전제어시스템을 개발하고자 한다. 또한 선진국이 개발한 동일 목적의 충전제어기의 효율보다 우수한 효율을 갖도록 하기 위하여 급속한 환경변화에 추종할 수 있는 MPPT(Maximum Power Point Tracker) 알고리즘을 탑재한 PWM(Pulse Width

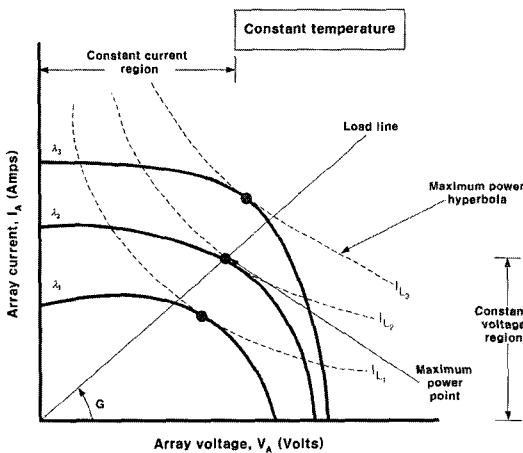
† 책임저자(한국해양대학교 선박전자기계공학부), E-mail : ojs@hhu.ac.kr, T : 051)410-4283

\* 한국해양대학교 대학원

Modulation) 기법의 충전제어기를 제안하고자 한다. 또한 현재 개발되어 사용되고 있는 아날로그 기반의 충전제어기의 개발비용을 절감하고, 신뢰성을 향상하기 위하여 디지털 기반의 충전제어기를 제안하고자 한다. 더불어 이 두 가지 방식의 성능차이를 실험을 통하여 확인하고자 한다.

## 2. 태양전지 및 어레이 특성

태양전지 어레이의 특성은 컨버터와 제어시스템에 깊은 영향을 끼치므로, 이들에 대해 서술하고자 한다. Fig. 1은 다른 빛의 세기  $\lambda$ 와 온도가 일정할때의 전형적인 전압-전류 곡선을 나타낸다.



**Fig. 1 Array volt-ampere curves showing maximum power and load line hyperbolas**

일반적으로, 빛세기와 온도에 따른 어레이 셀의 정적인 특성은 다음 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_G - I_{SAT} \left\{ \exp \left[ \frac{q}{AKT} (V + I_A R_S) \right] - 1 \right\} \quad (1)$$

단, 여기서

$$I_{SAT} = I_T \left[ \frac{T}{T_r} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_{GO}}{BK} \left( -\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_G = [I_{SC} + K_1(T_C - 28)] \frac{\lambda}{100} \quad (3)$$

이다.

$I$	cell output current
$V$	cell output voltage
$I_{SAT}$	cell saturation current
$T$	cell temperature in K
$\frac{K}{q}$	Boltzmann's constant divided by electronic charge
$T_C$	cell temperature in $^{\circ}C$
$K_I$	short circuit current temperature coefficient at $I_{SC}$
$\lambda$	cell illumination(mW/cm)
$I_{SC}$	cell short circuit current at $28^{\circ}C$ and $100mW/cm^2$
$I_G$	light-generated current
$E_{GO}$	band gap for silicon
$A, B$	ideality factors
$T_r$	reference temperature
$I_T$	saturation current at $T_r$
$R_S$	= series resistance

어레이 터미널에 연결된 컨버터는 정적 상태에서 저항성 부하에 의해 나타내어진다. 컨덕턴스 경사도  $G$ 에 의한 부하선과 어레이  $V_A$ - $I_A$  곡선의 교차는 동작점을 의미하고, 일치하는 직류전력은 컨버터에 의해 병합된다. 일정한 전력 궤적은 쌍곡선으로 나타나고, 최대 전력 쌍곡선들은 그림에서 보는것과 같이 각각의  $V_A$ - $I_A$ 곡선과 맞닿는다. 만일 컨버터 손실이 없다고 가정하면, 전력 균형으로부터 유용한 선전압은 일정하고,

$$P_L = V_L I_L = V_A I_A = P_A \text{ or}$$

$$I_L = \frac{V_A I_A}{V_L} = x P_A \quad (4)$$

여기서 선전압과 선전류는 제공평균 값이다. 식 (4)는 각 최대 전력 쌍곡선은 선전류  $I_L$ 의 일정한 크기에 상응함을 나타낸다. MPP 위의  $V_A$ - $I_A$ 곡선의 영역은 일정전류구간을 나타내고, 이에반하여 아래 구간은 일정 전압 구간을 나타낸다. 어레이

출력 전력은 부하선의 정사각 G의 제어에 의해 제어할 수 있다. 어떤  $V_A$ - $I_A$ 곡선에서, G가 0부터 증가하므로써, 어레이 전력은 최대 값에 도달할 때까지 증가한후 감소하며, G 조절을 통해 어레이의 최대출력을 얻게된다.<sup>[1]</sup>

### 3. MPPT 알고리즘

MPPT는 태양전지 어레이에 연결된 부하를 제어하여 임피던스 매칭을 최적화함으로써 최대출력점 동작이 가능하게 하는 것이다. MPPT의 핵심 기술은 태양전지 어레이의 전압, 전류 및 전력 등을 측정하여 MPP를 추적하는 알고리즘을 구현하는 것이다. MPPT 알고리즘의 구체적인 수행방법에 대하여서는 많은 연구가 진행 중에 있다. 본 연구에서는 MPPT 알고리즘을 C 언어로 구현하였으며, 태양전지 어레이의 파라미터를 입력하는 부분, 일사량에 따른 MPP 추적 부분, MPPT 구현 부분의 세 부분으로 나누어 구성하였다. 일반적으로 태양전지의 어레이는 일사량의 변화에 따라 약간의 전압변동 폭을 가진다.

Chart는 Fig. 2와 같고, 그림에서의  $V_{(n)}, I_{(n)}, P_{(n)}$ 은 태양전지 어레이의 순간 전압, 전류 및 전력이다. 그리고  $V_{(n-1)}, I_{(n-1)}, P_{(n-1)}$ 은 측정값 직전의 전압, 전류 및 전력 값이다. 본 연구에서는 전력귀환제어 하에서  $dP/dV=0$ 이 되도록 제어하고자 한다. MPPT 알고리즘을 구현하기 위해 식 (5)를 활용하였다. 여기서  $V_r$ 은 제어를 위한 기준전압이다.

$$dP = dV \left( I + \frac{dI}{dV} \cdot V \right) \tag{5}$$

MPPT 알고리즘은 전력 변화량  $dP$ 에 따라서 수행된다.  $dP$ 가 "0"이 아닌 경우에는 컨버터부의 PWM 스위칭을 통해 기준전압  $V_r$ 에 대한 제어를 하게된다.

### 4. 충전용 컨버터

효율적인 충전제어시스템을 확보하기 위해서는 우수한 충전효율을 갖춘 충전알고리즘을 적용해야 한다. 본 연구에서는 PWM 제어방식의 컨버터 충전제어기법을 적용한 충전제어기를 설계하고, 충전특성 및 효율을 통하여 성능을 확인하고자 한다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 태양광 발전 시스템의 충전용 컨버터 부분의 회로도이다. 태양광 발전시스템은 태양광 어레이가 있는 발전부, 발전된 전기를 충전하는 컨버터부, 충전된 전기를 보관하는 배터리가 있는 저장부로 나눌 수 있다. 컨버터는 buck 컨버터(buck converter) 특성을 갖는 것으로 PWM 알고리즘으로 운전된다. 이 경우 연속전류 모드로 운전되도록 PWM 알고리즘으로 스위칭 기법을 구축한다. 여기에서  $r_t$ 는 스위칭 소자인 MOSFET의 저항이고,  $V_F$ 는 다이오드의 스톱홀드(threshold)전압,  $R_D$ 는 다이오드 순방향 저항,  $r_L$ 은 L의 직렬등가저항,  $r_C$ 는 C의 직렬등가저항,  $r_S$ 는 태양전지 어레이의 등가저항이다. 회로도에서 SW(스위치)가 이상적인 스위치라고 하면,  $T(T_{on} + T_{off})$ 는 제어주기,  $T_{on} / T$ 는 듀티(duty)비이고,  $0 \leq T_{on} / T \leq 1$ 이다.

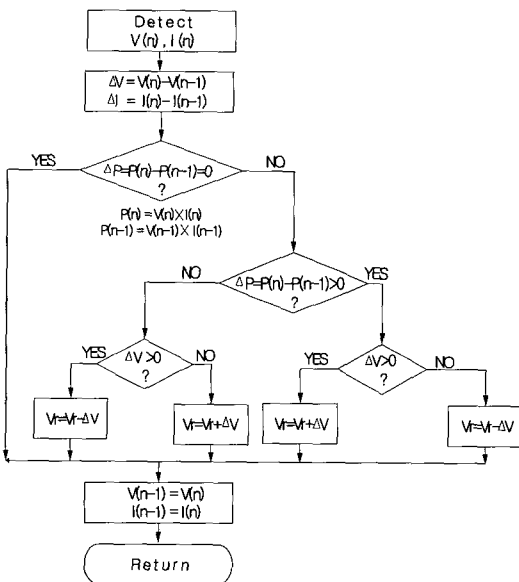


Fig. 2 Flowchart for MPPT strategy

본 연구에서 MPP를 추적기법에 활용한 Flow

$$i_{LC(t)} = \frac{\Delta i_{LC}}{T_{on}} t + I_L - \frac{\Delta i_{LC}}{2} \quad (6)$$

단,  $(0 < t \leq T_{on})$

$$i_{LC(t)} = -\frac{\Delta i_{LC}}{T_{off}} \cdot \frac{(t - T_{on})}{T} + I_L + \frac{\Delta i_{LC}}{2} \quad (7)$$

단,  $(T_{on} < t \leq T)$

여기서  $\Delta i_{LC}$ 는 인덕터의 리플전류의 피크치이다. 식 (6) 및 식 (7)의 전류가 연속전류상태에서 최적의 상태로 충전이 되도록 SW의  $T_{on} / T$ 의 비를 PWM 알고리즘으로 제어한다.

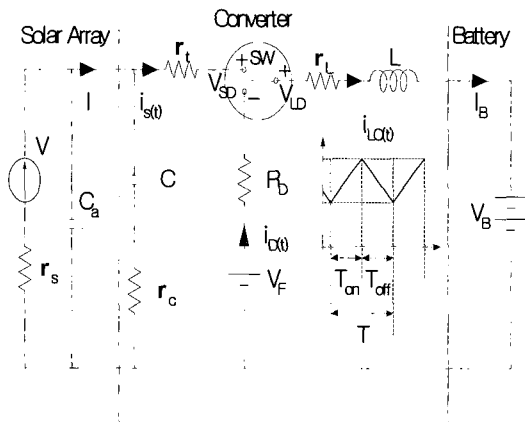


Fig. 3 Circuit for the PWM controlled converter

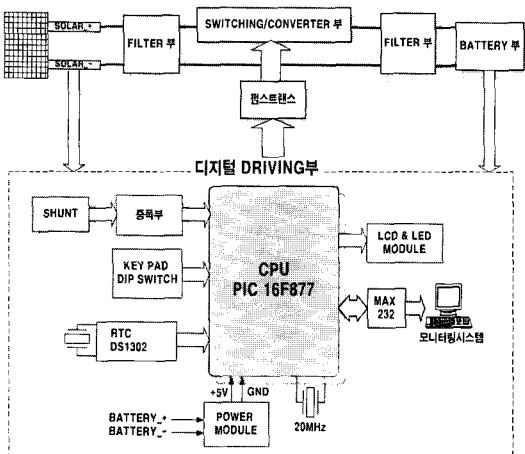


Fig. 4 Control block diagram

Fig. 4는 디지털 제어의 블록도이다. 마이크로프로세서에 의해 생성된 PWM신호는 펄스트랜스에 전달되고, 이로 인해 스위칭/컨버터부가 구동되게 된다. 마이크로프로세서에 의해 태양전지와 배터리로부터 전류와 전압을 검출하고, 검출 순간의 전력값과 그전의 전력값의 차를 비교하여 동작점이 최대출력점에 존재하는지를 판단한다. 전력차가 0이면 태양전지가 현재 최대출력이라 판단할 수 있으므로, 그전의 전력값을 순간의 전력값으로 업데이트하여 저장하고 다음 제어 루프를 수행한다. 하지만, 전력차가 0이 아니면 0이 되도록 스위치의 듀티비를 조절하여 동작점이 최대출력점에 존재하도록 한다.

### 5. 실험 및 고찰

본 연구의 실험을 위해서 태양광과 흡사한 파장을 내는 할로젠 램프(50W)를 80개 사용하여 인공 태양을 구현하였으며, 램프에 슬라이더를 연결하여 빛의 세기(일사량)를 조절할 수 있게 하였다. 태양전지 어레이는 60W급 2개를 직렬로 연결하여 실험하였다. 또한 본 연구의 목적인 충전제어기의 충전효율을 개선하기 위하여 스위칭용 펄스트랜스를 태양광 발전시스템의 특성에 적합하게 제작하여 사용하였다. 기존의 PWM 신호 발생용 소자를 활용한 아날로그 방식에 비하여 비용을 절감하고, 신뢰성을 향상하기 위해 듀티비( $T_{on} / T$ )를 제어하는 디지털 스위칭 알고리즘을 충전제어기에 적용하였다.

단시간에 최대로 충전하기 위해서는 많은 전류량이 배터리에 충전되도록 해야한다. 태양전지 어레이의 전압이 높을때, 스위치의 'on' 시간이 길어지면 배터리의 충전 전압이 낮아질 수 있다. 따라서 스위치의 'on'시간을 줄여서 높은 전압을 유지한 상태에서 배터리에 충전을 한다면 순간적으로 전류를 밀어넣어 배터리에 충전할 수 있다. 이처럼 스위치의 'on' 시간을 나타내는 듀티비를 조절하여 최대의 충전효율을 얻는다.

Fig. 5는 스위칭 알고리즘의 변화에 따른 각각의 실험 측정 파형을 나타낸다. (a)는 아날로그 스

위칭 회로를 구성한 후 측정된 파형이며, (b)는 각각의 아날로그 시스템을 최적으로 설계하여 재배치한 후 측정된 파형이다. (c)는 본 연구에서 제안한 방식인 디지털 스위칭 알고리즘을 적용한 회로에서 측정된 것이며, (d)는 본 연구를 위해 스위칭용으로 제작한 펄스 트랜스를 회로구성에 적용하고 컨버터 스위칭 회로를 최적으로 설계(구성소자의 용량을 실험을 통하여 결정함)하여 실험한 결과 파형이다.

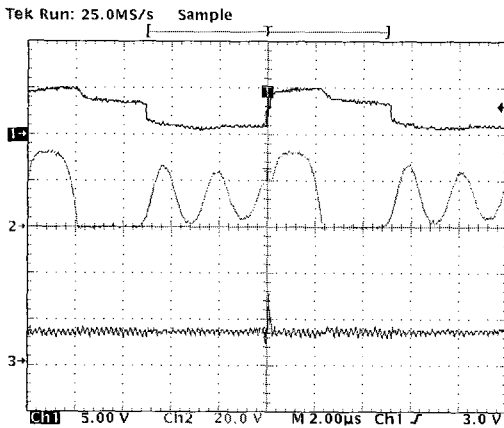
Fig. 5(a), (b), (c), (d)의 각 파형에서 오실로스코프 채널(Ch) 1은 아날로그 및 디지털 PWM 스위칭 신호를 표시하며, Ch 2는 스위칭 소자인 MOSFET의 구동신호, Ch 3은 실제로 배터리에

저장되는 전류량을 셉트를 거쳐 전압으로 변환한 후 증폭시켜 나타낸 것이다.

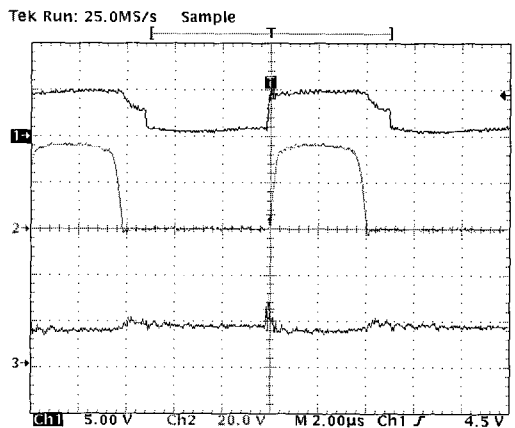
Table 1은 각 컨버터의 실험 데이터인 전압 ( $V_{PV}$ ), 태양전지어레이의 출력전류( $I_{PV}$ ), 배터리 전압( $V_{BT}$ ), 배터리 유입전류( $I_{BT}$ )를 나타낸다.

**Table 1 V, I value with each converter**

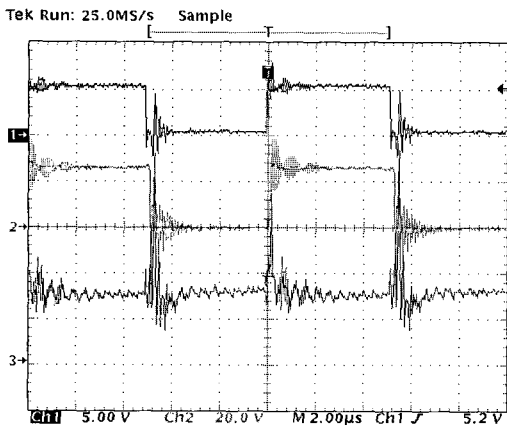
	$V_{PV}(V)$	$I_{PV}(A)$	$V_{BT}(V)$	$I_{BT}(A)$
Fig. 5(a)	33.7	3.3	13.4	3.3
Fig. 5(b)	33.5	3.4	13.4	3.4
Fig. 5(c)	32.9	3.4	13.3	7.1
Fig. 5(d)	33.2	3.4	13.3	7.9



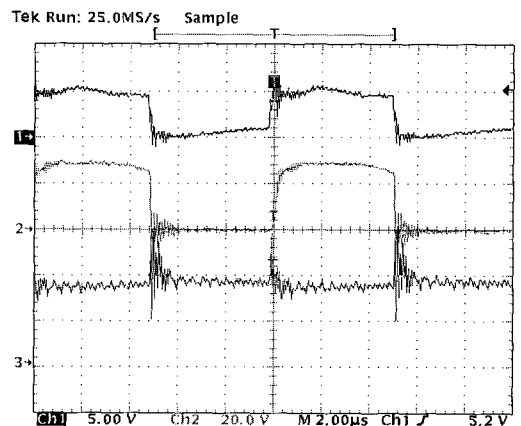
(a) Waveforms of analog circuit



(b) Waveforms of optimum analog circuit



(c) Waveforms with digital switching algorithm



(d) Waveforms with optimum digital switching circuit

**Fig. 5 Experimental results of the charging controller**

Table 2는 Table 1의 실험 데이터로 태양전지어레이의 출력전력( $P_{PV}$ ), 배터리 입력전력( $P_{BT}$ ), 컨버터의 전력변환효율( $(P_{BT}/P_{PV}) \times 100$ )을 나타낸다.

**Table 2 Converter efficiency**

	$P_{PV}(W)$	$P_{BT}(W)$	변환효율(%)
Fig. 5(a)	111.21	44.22	39.76
Fig. 5(b)	113.9	45.56	40
Fig. 5(c)	111.86	94.43	<b>84.42</b>
Fig. 5(d)	112.88	105.07	<b>93.08</b>

Table 2에서 보는바와 같이 아날로그 스위칭 회로로 구성된 Fig. 5(a)와 (b)의 변환효율은 약 40%인 반면, 디지털 스위칭 회로로 구성된 Fig. 5(c), (d)의 변환효율은 약 90%로 아날로그보다 두배의 높은 효율을 나타냄을 알 수 있다. 실제 외부환경에서는 구름한점 없이 맑은 날의 경우를 제외하고, 일사량, 온도 등이 시시각각 변하는 경우가 많다. 아날로그 시스템의 경우 둔감한 PWM Duty Rate로 인해 변화하는 MPP를 추종하여 동작하기 어렵다. 그러나 디지털 시스템의 경우, MPPT 알고리즘에 의해 일사량, 온도 등이 변하여도 항상 그때의 MPP를 추종하여 제어신호를 내보내므로 PV Array에서 배터리로 유입되는 전력은 항상 최대로 유지할 수 있게 해준다. 따라서, 제안한 방식으로 충전제어기를 구성하면 아날로그 방식에 비하여 충전효율을 개선할 수 있고, 회로의 간략화로 신뢰성을 확보할 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 독립형 태양광 발전시스템에 적합한 충전제어기 개발에 관하여 연구하였다. 이를 위해 적용한 MPPT 알고리즘은 충전제어기 활용에 용이함을 알 수 있었다. 그리고 본 논문에서 제안한 디지털 기반의 PWM 방식 충전용 스위칭 알고리즘은 기존의 아날로그 충전방식에 비하여 충전효율이 우수함을 확인하였다. 따라서 상용전원의 사용이 어려운 해양시설물, 가로등과 같이 특수한 목적을 가지는 곳에 주로 사용되는 즉, 독립형 시스템에 적용이 가능하다.

그러나 앞으로 해양시설물 등의 실용화를 위해서는 해양환경 변화에 따른 실험과, 시스템의 방염, 방습과 같은 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] Bimal K. Bose, Paul M. Szczesny, Robert L. Steigerwald, "Microcomputer Control of a Residential Photovoltaic Power Conditioning System", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. IA-21, No. 5, pp. 1182-1191, September/October 1985
- [2] T. J. Liang, Y. C. Kuo and J. F. Chen, "Single-stage photovoltaic energy conversion system", IEE proc-electr. power appl., Vol. 148, No. 4, pp. 339-344, 2001.
- [3] H. Sugimoto, "A new scheme for maximum photovoltaic power tracking control", IEEE PCC-Nagaoka, pp. 691-696, 1997.
- [4] Tomas Markvart, "Solar Electricity", JOHN WILEY & SONS, 1994
- [5] Muhamad. H. Rashid, "Power Electronics Circuits, Devices, and Applications", Prentice-Hall, Inc, pp.203-206, 1988

## 저 자 소 개



### 오진석 (吳珍錫)

1983~1986 영국 ZODIAC 선박회사 엔지니어. 국방과학연구소 연구원('89~'92) 양산대학 전임강사, 조교수, 학과장('92~'96). 한국해양대학교 전임강사, 조교수, 부교수('96~현재). 영국 Cardiff대학 교환교수('01~'02). 한국박용기관학회 편집위원('02~현재). 한국산학연 논문집 편집위원('02~현재). 영국 K.O. TECH R&D 한국센터장('04~현재)



### 박준호 (郭俊浩)

1980년 7월생, 2002년 한국해양대학교 기관시스템공학부 전기전자제어 전공 졸업, 현재 한국해양대학교(원) 기관공학과(메카트로닉스) 석사과정 2년.