

광대역 고출력 전자기 펄스에 의한 마이크로컨트롤러 소자의 매개변수들의 민감성 분석

논문

59-2-24

The Sensitivity of the Parameters of Microcontroller Device with Coupling Caused by UWB-HPEM (Ultra Wideband-High Power Electromagnetics)

황 선 목[†] · 홍 주 일^{*} · 허 창 수^{**}

(Sun-Mook Hwang · Joo-Il Hong · Chang-Su Huh)

Abstract - Modern electronic circuits are of importance for the function of communication, traffic systems and security systems. An intentional threat to these systems could be of big casualties and economic disasters. This paper has shown damage effect of microcontroller device with coupling caused by UWB-HPEM(Ultra Wideband-High Power Electromagnetics). The UWB measurements were done at an Anechoic Chamber using a RADAN UWB voltage source, which can generate a transient impulse of about 180 kV. The susceptibility level for microcontroller has been assessed by effect of various operation line lengths. The results of susceptibility analysis has showed that the effect of the reset line length on the MT(Malfunction Threshold) is larger than the effect of the different line length(Data, Power, Clock). With the knowledge of these parameters electronic system can be designed exactly suitable concerning the system requirements. Based on the results, susceptibility of microcontroller can be applied to protection plan to elucidate the effects of microwaves on electronic equipment.

Key Words : Susceptibility, UWB-HPEM, Microcontroller, MT

1. 서 론

고출력 전자기파는 전계강도가 100 V/m 이상의 펄스 주 기 신호 또는 연속 주기 신호를 의미한다[1]. 이러한 HPEM (High Power Electromagnetics) 발생장치 및 방사 시스템에 대한 연구는 1960년대 말부터 미국을 중심으로 하여 세계 각처에서 비중 있게 이루어지고 있다. 1967년 미국 항공모함 Forrestal이 베트남에서 작전 중 대기 중이던 전투기 F-4에서 Skyhawk 미사일이 의도되지 않게 발사 되는 사고가 있었다. 이 사고는 항공 연료에 불이 붙고 연이은 전투기, 폭탄, 미사일 등의 폭발로 \$ 720만의 손실과 인명피해가 있었다. 당시 사고의 원인은 미사일 발사 케이블에 차폐가 되어 있지 않아 갑판 위의 레이더에 의한 노이즈 신호 때문인 것으로 밝혀졌다. 이는 고출력 전자기파에 의해 군사시설이 얼마나 큰 피해를 볼 수 있는지를 시사하는 사례이다[2]. 현재 연구 개발하고 있는 고출력 전자기파 발생장치[HPEM : HPM (High Power Microwaves), UWB (Ultra Wideband)] 들은 짧은 펄스 (~100 nsec)에서 Giga-Watts 수준의 전자파를 발생시킬 수 있다. 이러한 고출력 전자기파는 군사적인 목적으로 인명살상을 하지 않고, 무기나 전자장비 근처에 강력한 IEMI (Intentional Electromagnetic Interference)를 발

생시켜 반도체 소자의 내부회로를 파괴하여, 하드웨어적으로 영구적인 손상을 일으키게 한다. 또한 반도체 소자의 논리적 오류를 발생하게 하여 시스템 작동을 일정 시간동안 마비시키는 역할도 한다. 고출력 전자기 펄스의 주요 대상은 발전소, 항공기, 고속전철, 전투기, 주요 전자장비등이 된다. 그리고 고출력 전자기파는 전력설비의 전력생산을 불가능하게 할 뿐 아니라 자동차와 항공기의 전기적 접화 역시 막아 버리게 한다. 그러나 현대사회는 군사적 목적으로 사용되는 것 뿐만 아니라 테러의 위협으로 주요 산업시설(의료, 통신, 교통 통제, 금융, 보안 등)을 마비시켜 사회적, 경제적으로 엄청난 피해가 발생할 수 있다. 이러한 고출력 전자기파의 위협으로부터 자유로울 수 없기 때문에 주요 산업 시설 및 군사용 장비에 대한 IEMI 대응 연구가 필요한 시점이고, 그 적용 분야가 아직까지는 특수하고 한정되어 있는 만큼 적극적인 연구개발이 필요하다. 실제로 전자장비나 반도체 소자가 고출력 전자기 펄스에 노출되었을 때 칩의 내부회로를 녹여 손상시켰다고 보고되고 있고, 이런 관련된 여러 가지 현상들에 대한 연구가 이루어지고 있다.[3]-[5]

본 연구는 광대역 고출력 전자기 펄스가 DUT(Device Under Test)에 노출되었을 때, 마이크로컨트롤러 소자의 어느 매개변수가 민감하게 반응하는지 분석하고 이에 따른 오작동 전계강도를 알아보았다.

2. 본 문

2.1 실험 방법

그림 1은 반 무반사실에서 광대역 고출력 전자기 펄스에 의한 마이크로컨트롤러 소자의 매개변수들의 민감성 분석을 알아보기 위한 실험이다. DUT는 광대역 고출력 전자기 펄

† 교신저자, 정회원 : 인하대학교 전기공학과 박사과정

E-mail : hsm-24@hanmail.net

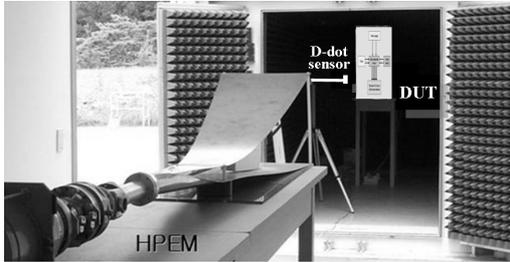
* 정 회 원 : 인하대학교 전기공학과

** 정 회 원 : 인하대학교 전기공학과 교수

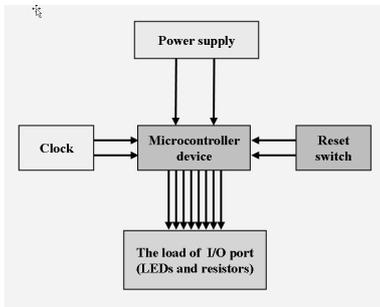
접수일자 : 2009년 9월 16일

최종완료 : 2009년 11월 18일

스 장치로부터 일정한 거리에 설치하였고, DUT에 가해지는 전기장 세기는 D-dot 센서를 이용하여 측정하였다. 그리고 마이크로컨트롤러 소자의 피해효과는 마이크로컨트롤러 소자에 의하여 작동되는 LED 회로를 통해 CCD 카메라로 확인하였다.



(a) 고출력 전자기 펄스 실험

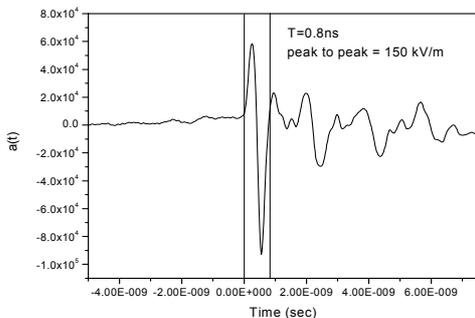


(b) DUT test set

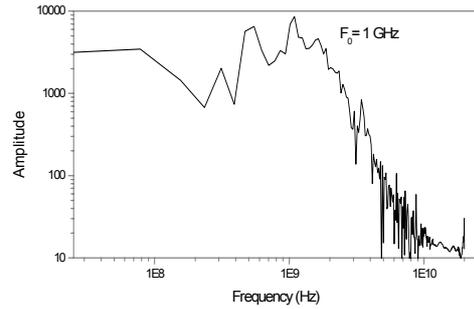
그림 1 실험 구성도

Fig. 1 The schematic of experimental setup

광대역 고출력 전자기 펄스 발생장치는 RADAN을 사용하였다. RADAN은 50 ohm 부하로 중단되었을 때 최대 180 kV(peak-to peak)의 출력전압을 발생한다. 그리고 전자기 펄스의상승시간은 200 ps이고, 펄스폭은 1 ns 미만을 갖는다. 이와 같은 펄스 발생장치에 TEM 혼 안테나를 결합하면 전기장을 갖는 전자기 펄스를 발생시킬 수 있다. 그림 2는 펄스의 시간 측 성분과 주파수 스펙트럼을 보여준다. 이 펄스는 위아래에 두 개의 극값을 가지며 3.2 m 거리에서 약 150 kV/m(peak to peak)의 크기를 갖는다. 그리고 DUT에 가해지는 전기장 세기는 RADAN에서부터 DUT의 거리에 따라서 수~수십 kV/m 까지 조절이 가능하다.



(a) 시간 영역



(b) 주파수 영역

그림 2 광대역 고출력 전자기 펄스의 시간 영역과 주파수 영역
Fig. 2 The time and frequency domain of UWB-HP-EM

광대역 고출력 전자기 펄스에 의한 마이크로컨트롤러 소자의 피해효과를 알아보기 위해 사용된 반도체는 AT89C51을 사용하였다. 그리고 리본 케이블의 길이변화에 따른 매개변수들의 민감성 분석을 알아보았고, 마이크로컨트롤러의 기본 특징은 다음과 같이 설명하였다.

- High-speed CMOS technology
- Fully Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Flash Programmable and Erasable Read Only Memory (PEROM)
- 128 x 8-Bit Internal RAM
- 32 Programmable I/O Lines

그림 3은 광대역 고출력 전자기 펄스에 의한 마이크로컨트롤러 소자의 오작동 및 파괴를 정의하였다. 여기에서 오작동(Malfunction)은 물리적 손상을 의미하지 않고 단지 reset(self-, external- or power reset)을 통해 원래의 기능으로 회복되는 경우를 의미하는 용어로 사용하였다. 그리고 파괴(Destruction)는 물리적 손상을 의미하며 하드웨어적 교체를 통해서만 회복되는 경우를 정의하였다. MT(Malfunction Threshold)는 임계 전계강도 값으로 MFR의 임계 5 %를 나타낸 것이다. 그리고 MB(Malfunction Bandwidth)는 전계강도의 대역폭으로 MFR의 임계 5 %에서 95 %까지의 변화를 나타낸 것이다.

| Malfunction | Destruction |
|---|---|
| | |
| $MFR = \frac{\text{The number of malfunctions}}{\text{The number of tested devices}}$ | $DFR = \frac{\text{The number of destructions}}{\text{The number of tested devices}}$ |

그림 3 오작동 및 파괴 정의

Fig. 3 The definition of malfunction and destruction

2.2 실험 결과 및 고찰

본 실험은 마이크로컨트롤러 시스템에 고출력 전자기 펄스를 인가 시, 마이크로컨트롤러 시스템에 끼치는 여러 가지 매개변수들을 리본 케이블의 길이변화에 따라 민감성 분석을 하였다. 예를 들면, 도선의 길이변화에 따른 데이터선, 전원선, 그리고 클럭선과 리셋선의 임계 오작동 특성을 조사하였다. 그림 4는 도선의 길이변화에 따른 매개변수들이 오작동 되는 전계강도의 MT를 보여주었다.

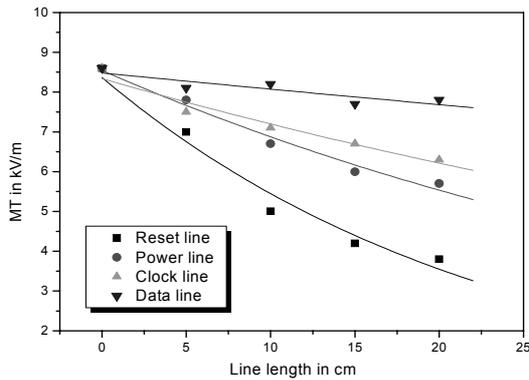


그림 4 도선의 길이변화에 따른 매개변수들의 임계 오작동
Fig. 4 The threshold malfunction of parameter by various operation line lengths

그림에서 알 수 있듯이, 도선의 길이변화에 따른 리셋선은 다른 매개변수보다 아주 민감하게 반응하였고, 이에 반해 데이터선은 매우 적은 영향으로 나타내었다. 그리고 클럭선과 전원선의 MT 변화도는 거의 비슷하였다. 대부분의 길이변화에 따른 전계강도(MT)는 지수 함수적으로 떨어지는 것으로 관찰되었다. 이때 오작동이 발생한 이유는 광대역 고출력 전자기 펄스에 의한 CMOS의 n형과 p형 채널 트랜지스터 부근에서 기생하는 사이리스터에 의해 래치업 현상을 일으킨 것으로 생각된다. 또한 커플링 전류 때문에 IC 소자의 출력 전압/전류는 잡음여유와 전력 소모의 변동으로 일정상태로 유지할 수 없다. 따라서 디지털 시스템은 비트에러에 의해서 오작동이 발생하게 될 것으로 사료된다[5][6]

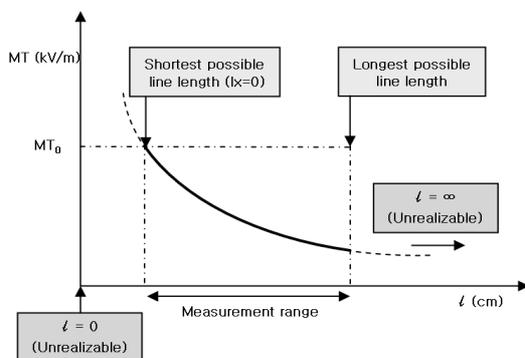


그림 5 도선의 길이변화에 따른 전계강도 MT의 기본원리
Fig. 5 The Principal of BT for various operation line lengths

그림 5는 도선의 길이변화에 따른 전계강도 MT의 기본원리이다. 커플링 길이($l_x=0$ cm)인 MT는 전자부품 시스템에 전자자기적으로 커플링이 일어나지 않기 때문에 무한대로 수렴한다. 그리고 커플링 길이(l_x)가 무한대로 접근한다면, MT는 영으로 수렴하게 된다. 이는 작은 전계강도에서도 시스템에 영향을 줄 수 있는 전압/전류가 발생될 수 있기 때문이다.[7]

민감성 벡터 $\vec{MT}(l_x)$ 는 마이크로컨트롤러 시스템에 끼치는 각 매개변수의 전계강도 MT를 설명하기 위한 정의이다. 이 벡터의 성분은 실제 가능한 최소 길이로부터 출발하여 각각 매개변수(데이터선(l_{D0}), 전원선(l_{P0}), 리셋선(l_{R0}), 클럭선(l_{C0}))의 길이변화에 따른 전계강도 MT로 구성하였다. 민감성 벡터의 $\vec{MT}(l_x)$ 는 다음과 같은 공식으로 나타내었다.

$$\vec{MT}(l_x) = \begin{pmatrix} MT_{Data} \\ MT_{Clock} \\ MT_{Power} \\ MT_{Reset} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} MT(l_{Dx}, l_{Cx}, l_{Px}, l_{Rx}) \\ MT(l_{D0}, l_{C0}, l_{P0}, l_{R0}) \\ MT(l_{D0}, l_{C0}, l_{Px}, l_{R0}) \\ MT(l_{D0}, l_{C0}, l_{P0}, l_{Rx}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

민감성 벡터의 $\vec{MT}(l_x)$ 는 지수적으로 떨어지므로 각 매개변수의 길이변화에 따른 지수함수로 근사시킬 수 있다. 이 근사함수는 상수 MT_0 , α 에 대해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{MT}(l_x) = MT_0 \cdot e^{-\alpha l_x} \text{ or } \ln \vec{MT}(l_x) = \ln MT_0 - \alpha l_x \quad (2)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} \alpha_{Data} \\ \alpha_{Clock} \\ \alpha_{Power} \\ \alpha_{Reset} \end{pmatrix} \quad (3)$$

이 지수함수에 있어서, α 는 각 매개변수의 길이변화에 따른 오작동 영향을 주는 민감성 요소이다. 다음 식은 두 변수 간에 상관관계를 나타내는 함수 ($y=f(t)$)를 찾기 위해 최소자승법을 사용하였다[5].

$$E = \sum_{i=1}^n [(\ln MT(l_i) - (\ln MT_0 - \alpha l_i))]^2 \quad (4)$$

데이터에 적합한 최적의 선형을 찾기 위해서는 이 오차를 최대한 줄여야 한다. 즉 $\ln MT_0$, α 는 E를 최소화하는 값이 되어야 한다. 오차를 최소화하기 위한 $\ln MT_0$, α 를 구하기 위해서는 $\ln MT_0$, α 에 편미분한 값이 0이 되면 된다.

$$0 = \frac{\partial}{\partial (\ln MT_0)} \sum_{i=1}^n [(\ln MT(l_i) - (\ln MT_0 - \alpha l_i))]^2 \quad (5)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{i=1}^n [(\ln MT(l_i) - (\ln MT_0 - \alpha l_i))]^2$$

이들 두 식을 간단히 하여 정규방정식(normal equation)을 얻을 수 있다. 그리고 이 정규방정식을 이용하여 연립방정식의 해는 다음과 같다. 민감성 벡터 α 와 MT_0 의 매개변수는 측정값을 이용해서 계산할 수 있다[8].

$$\ln MT_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \ln MT(l_i) \cdot \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n \ln MT(l_i) x_i \cdot \sum_{i=1}^n l_i}{n(\sum_{i=1}^n l_i^2) - (\sum_{i=1}^n l_i)^2} \quad (6)$$

$$MT_0 = e^{\ln MT_0}$$

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \ln MT(l_i) \cdot \sum_{i=1}^n l_i - n(\sum_{i=1}^n \ln MT(l_i) l_i)}{n(\sum_{i=1}^n l_i^2) - (\sum_{i=1}^n l_i)^2}$$

표 1 각 매개변수의 길이변화에 따른 각 매개변수의 민감성 요소

Table 1 The sensitivity vector of the parameters by various operation line lengths

| Microcontroller(AT89C51) | | |
|--------------------------|----------------------------------|--|
| Reset line | MT ₀ =8.4 α=0.0429 | $\left(\begin{array}{l} \alpha_R = 0.0429 \\ \alpha_P = 0.0217 \\ \alpha_C = 0.0147 \\ \alpha_D = 0.0049 \end{array} \right)$ |
| Power line | MT ₀ =8.5 α=0.0217 | |
| Clock line | MT ₀ =8.3 α=0.0147 | |
| Data line | MT ₀ =8.5 α=0.0049 | |

표 1은 고출력 전자기 펄스를 인가 시, 네 가지 매개변수들을 길이변화에 따른 마이크로컨트롤러 시스템의 민감성 요소를 나타내었다. 최소제곱법을 이용하면 각 MT₀의 오차가 발생하기 때문에 이 오차를 제거하기 위해서는 모든 MT₀를 산술평균으로 계산하였다.

민감성 요소(ζ)는 각 매개변수에 끼치는 영향을 평가하기 위한 방법이다. 민감성 요소(ζ)는 각각의 민감성 벡터 요소(α)을 가장 큰 민감성 벡터 요소(α)로 나누고, 100을 곱하였다.

$$\zeta [\%] = \frac{\alpha_x}{\alpha_{Max}} \times 100 \quad (7)$$

그림 6은 마이크로컨트롤러 시스템에 대한 각 파라미터의 민감성 요소(ζ)를 나타낸 것이다. 전계강도(MT₀)가 8.4 kV/m 일 때, 리셋에 민감성 요소가 100%로 가장 높았고, 그다음으로 전원(50.6%), 클럭(34.3%), 데이터(11.5%)로 나타내었다. 따라서 처음 오작동이 발생한 지점은 리셋부분에서 발생한 것으로 알 수 있다.

표와 그림에서 알 수 있듯이 마이크로컨트롤러 소자의 민감성 요소는 각 매개변수의 길이변화에 따라 오작동 영향과 관련되어 있음을 알 수 있다. 따라서 시스템 설계에서 반도체 부품은 사용용도에 맞게 기존보다 높은 오작동 임계 전계강도(MT)를 갖는 것을 선택 할 수 있다. 또한 긴 리셋선이 필요하다면, 민감성이 작은 부품을 선택할 수 있다. 만약 시스템 설계에 있어서 민감성이 작은 부품이 없다면 민감성이 큰 매개변수의 길이를 짧게 설계하여 반도체 부품의 민감성을 감소시킬 수 있다고 사료된다.

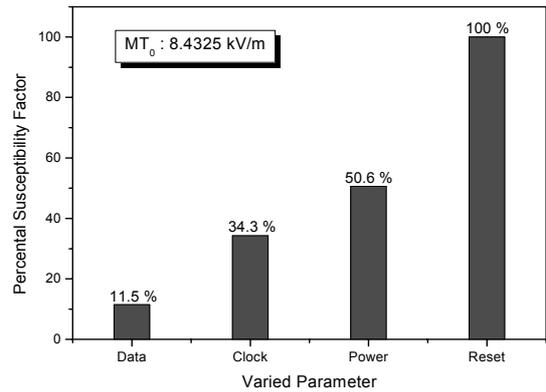


그림 6 마이크로컨트롤러 시스템에 대한 민감성 요소

Fig. 6 Percent sensitivity factor for microcontroller system

3. 결 론

본 연구는 고출력 전자기 펄스에 의한 마이크로컨트롤러 소자의 민감성 분석과 이에 따른 오작동 전계강도를 알아보았다. 고출력 전자기 펄스에 의한 마이크로컨트롤러 소자의 리셋 선은 다른 매개변수(데이터선, 클럭선 파워선)보다 가장 민감하게 오작동이 반응하였다. 이때 오작동이 발생한 이유는 광대역 고출력 전자기 펄스에 의한 CMOS의 n형과 p형 채널 트랜지스터 부근에서 기생하는 사이리스터에 의해 래치업 현상을 일으킨 것으로 생각된다. 또한 커플링 전류 때문에 IC 소자의 출력 전압/전류는 잠음여유와 전력 소모의 변동으로 일정 상태로 유지할 수 없다. 그리고 대부분의 오작동 임계 전계강도(MT)는 지수 함수적으로 떨어지는 것으로 알 수 있었다. 이에 각 매개변수의 길이변화에 따른 민감성 벡터 $\vec{MT}(l_x)$ 는 지수함수로 근사화 시킬 수 있다. 또한 최소자승법을 이용하여 마이크로컨트롤러 소자는 각 매개변수의 길이변화에 따라 각 매개변수의 민감성 요소를 계산하였다. 이러한 민감성 요소인 α는 오작동 영향과 관련되어 있음을 알 수 있다. 그러므로 시스템 설계에서 반도체 부품은 사용용도에 맞게 기존보다 높은 오작동 임계 전계강도(MT)를 갖는 것을 선택 할 수 있다. 또한 민감성이 큰 매개변수의 길이를 짧게 설계하는 것은 반도체 부품의 민감성을 감소시킬 수 있다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Electromagnetic compatibility (EMC)- Part 1-5 : High power electromagnetic (HPERM) effects on civil systems, IEC 61000-1-5 2004
- [2] Clayborne D. Talyer, D. V. Giri, "High-Power Microwave Systems and Effects", Taylor&Fransis, 1994

- [3] Mats G. Bäckström, "Susceptibility of Electronic Systems to High Power Microwaves: Summary of Test Experience" IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility, Vol. 46, NO. 3, Augst 2004
- [4] William A. Radasky, Carl E. Baum, and Manuem W. Wik, "Introduction to the Special Issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)", IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, 2004
- [5] S. M. Hwang, J. I. Hong, and C. S. Huh, "Characterization of The Susceptibility of Integrated Circuits with Induction caused by High Power Microwaves, Progress In Electromagnetics Research, PIER, Vol. 81, 61 - 72, 2008
- [6] Kyechong Kim Iliadis, A.A., "Critical Upsets of CMOS Inverters in Static Operation Due to High-Power Microwave Interference", Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on, Vol. 49, Issue 4, Nov. 2007
- [7] Camp, M., H. Gerth, H. Garbe, and H. Haase, "Predicting the breakdown behavior of microcontrollers under EMP/USB impact using a statistical analysis," IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, 368 - 79, 2004.
- [8] Richard L. Burden, J. Douglas Faires, "Numerical analysis" pp. 484-493

저 자 소 개



황 선 목 (黃 先 默)

1976년 5월 2일생. 2003년 원광대학교 전기공학과 학사 졸업, 2005년 인하대학교 전기공학과 석사 졸업, 2005년~현재 인하대학교 전기공학과 박사과정



홍 주 일 (洪 胄 壹)

1975년 10월 21일생. 2003년 세명대학교 전기공학과 학사 졸업, 2005년 인하대학교 전기공학과 석사 졸업, 2005년~2009년 인하대학교 전기공학과 박사졸업



허 창 수 (許 昌 洙)

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 1983년 인하대학교 전기공학과 석사 졸업, 1987년 인하대학교 전기공학과 박사 졸업, 1993년~현재 인하대학교 전자전기공학부 교수