

## OFDM 시스템에 미치는 HEMP 간섭 영향 분석

# An Analysis of the HEMP Interference Effect in OFDM System

성 윤 현<sup>1</sup> · 장 은 영<sup>2\*</sup> · 윤 석 범<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(주) 네오피스

<sup>2</sup>국립 공주대학교 공과대학 전기전자제어공학부

<sup>3</sup>국립 공주대학교 공과대학 광공학과

Yun-Hyeon Seong<sup>1</sup> · Eun-Young Chang<sup>2\*</sup> · Seok-beom Yoon<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NEOPIS Co.,Ltd., Gyeonggi-do 430-815, Korea

<sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Kongju National University, Chungcheongnam-do 331-717, Korea

<sup>3</sup>Department of Optical Engineering, Kongju National University, Chungcheongnam-do 331-717, Korea

### [요 약]

본 연구는 지구의 높은 고도에서 핵폭발로 발생된 HEMP (high-altitude electromagnetic pulse)가 발생 즉시 지면에 도달하면서 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 시스템에 미치는 영향을 분석한다. HEMP가 미치는 영향은 BER (bit error rate) 특성으로 확인한다. 시스템의 Q-factor로 인해 간섭 영향의 지속시간이 변화가 발생한다. Q값이 작으면, 간섭으로부터의 회복이 빠르고, Q값이 크면 영향을 받는 지속시간이 길어져 회복이 300~600%까지 늦어짐을 확인하였다.

### [Abstract]

High-altitude electromagnetic pulse (HEMP) is generated from a nuclear burst at high altitudes above the Earth, the electromagnetic fields reach the ground nearly simultaneously with regard to the operation time of systems. The aim of this analysis is to inquire about HEMP characteristics and to analyze about effect in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system. Specifically, HEMP characteristics are classified field sources, spatial coverage, time domain behavior, frequency spectrum and field intensities in this study. Bits error rate (BER) of the receiver with the software simulation is confirmed for the HEMP effect. Q-factor made a difference about interference duration by transfer characteristics of system. When Q factor is smaller, the recovery time from HEMP interference is short. To the contrary, if the Q factor is larger, the recovery duration is lasted longer by 300-600%.

**Key word** : Bit error rate, High-altitude electromagnetic pulse, Orthogonal frequency division multiplexing, Q-factor, Signal to interference and noise ratio.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.3.244>



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.

Received 27 May 2015; Revised 2 June 2015  
Accepted (Publication) 21 June 2015 (30 June 2015)

\*Corresponding Author; Eun-Young Chang

Tel: +82-10-7311-0335

E-mail: ce yng@kongju.ac.kr

## 1. 서론

1960년대 미국과 소련은 핵실험을 통해 HEMP의 발생을 확인하였고, 1963년 부분적인 핵실험 금지 조약이 발효되기 전까지 수십 회 이상의 핵실험을 통해 전자기 펄스에 대한 정보가 수집되었다[1].

또한 핵폭발의 발생 원리를 모방하여 순간적으로 EMP (Electromagnetic pulse) 파형을 발생시켜 넓은 주파수 대역과 높은 진폭의 간섭 신호를 방출하여 군용 및 민간 인프라 장비를 위협하는 무기도 개발되었다[2].

이와 함께 비의도적인 원자력 발전소의 폭발 위험과 적대적 핵실험 및 핵폭발 상황의 위험이 점차 증가되는 상황에서 통신 수단의 생존은 일상적인 정보 전달 이외에도 비상 상태 전파를 위한 중요한 관심사이다.

또한 만일의 사태를 대비할 수 있는 통신수단에 대한 방호대책의 마련과 기존 방비 절차에 대한 재검토도 함께 이루어져야 할 내용이다.

기존의 전자기 차폐 및 접지가 이루어진 고정형 OFDM 방식의 무선통신 시스템을 대상으로 HEMP가 미치는 영향을 확인하고, 악영향에 대처하는 방안을 모색한다. 보호가 이루어진 수신 시스템에서 반송파 대역을 포함한 영향과 함께 전자기파 침투로 인한 정보신호 대역도 고려하여 HEMP 신호를 시간에 따라 지수 함수적으로 감쇠되는 재밍(jamming) 형태의 간섭으로 가정한 해석모델을 설정하고, 수치적 해석 모델을 프로그램화하여 HEMP의 영향을 해석한다.

## II. HEMP

### 2-1 발생 원리

핵폭발에 의해 중성자들의 비탄성 충돌이 일어나 감마선이 발생하고 그림 1과 같이 고도 20~40 km 대기층으로 쏟아진다. 이 감마선은 콤프턴(compton) 산란 효과에 의해 대기 속에 있는 원자번호가 낮은 원자들과 충돌하여 외곽전자를 분리하면서 대기를 이온화시키는 과정으로 전자기 펄스가 만들어진다[1],[2].

### 2-2 시간 특성

HEMP는 단일 펄스가 아닌 시간상에서 3가지 주된 파형으로 구성되며 그 특징은 다음 그림과 같다. 발생 초기  $E_1$  파형의 전자계는 정전기 방전에서 발생된 것과 흡사하나 임계전압이 매우 크며, 다음과 같다.

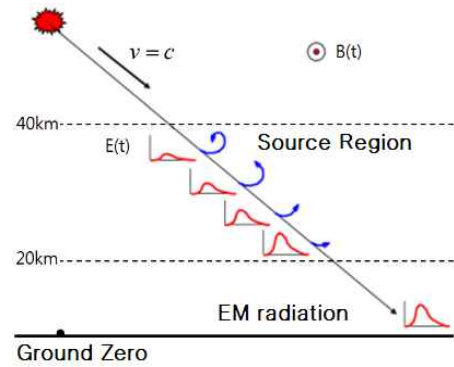


그림 1. 고고도 핵폭발에 의한 전자기 생성

Fig. 1. Electromagnetic generation by high altitude nuclear burst.

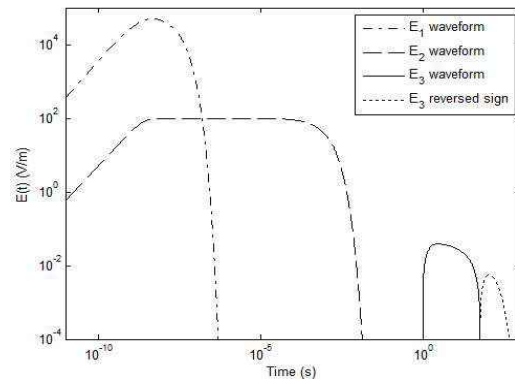


그림 2. 시간에 따른 HEMP 펄스

Fig. 2. HEMP pulse by time domain.

$$E_1(t) = \begin{cases} 0 & , t \leq 0 \\ E_{01} \cdot k_1 (e^{-a_1 t} - e^{-b_1 t}) & , t > 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $E_{01}=50$  kV/m,  $k_1=1.3$ ,  $a_1=4 \times 10^7$  s<sup>-1</sup>,  $b_1=6 \times 10^8$  s<sup>-1</sup>으로 정의된다[3],[4].

발생 중기에 주로 나타나는  $E_2$  파형은 낙뢰에 의해 생성된 전자계와 비슷하며, 강도는 낮지만 시간에 따라 크게 변화하지 않고, 다음과 같이 표시된다.

$$E_2(t) = \begin{cases} 0 & , t \leq 0 \\ E_{02} \cdot k_2 (e^{-a_2 t} - e^{-b_2 t}) & , t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $E_{02}=50$  kV/m,  $k_2=1.3$ ,  $a_2=1000$  s<sup>-1</sup>,  $b_2=6 \times 10^8$  s<sup>-1</sup>으로 정의된다[3],[4].

발생 말기에 나타나는  $E_3$  파형은 지자기 폭풍에 의해 만들어진 전자계와 비슷하게 수 초에서 수백 초까지 지속되며, 다음과 같다.

$$E_3(t) = E_i(t) - E_j(t) \quad (3)$$

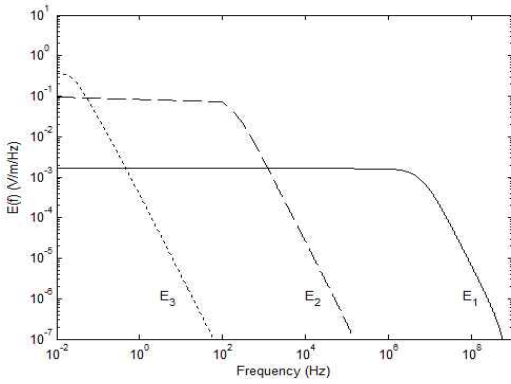


그림 3. 주파수에 따른 HEMP 펄스  
**Fig. 3.** HEMP pulse by frequency domain.

$$E_i(t) = \begin{cases} 0 & , \tau \leq 0 \\ E_{0i} \cdot k_i (e^{-a_i \tau} - e^{-b_i \tau}) & , \tau > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$E_j(t) = \begin{cases} 0 & , \tau \leq 0 \\ E_{0j} \cdot k_j (e^{-a_j \tau} - e^{-b_j \tau}) & , \tau > 0 \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $\gamma = t - 1$ ,  $E_i = 0.04$  V/m,  $k_i = 1.058$ ,  $a_i = 0.02$  s<sup>-1</sup>,  $b_i = 2$  s<sup>-1</sup>,  $E_j = 0.01326$  V/m,  $k_j = 9.481$ ,  $a_j = 0.015$  s<sup>-1</sup>,  $b_j = 0.02$  s<sup>-1</sup>으로 정의한다[3],[4].

**2-3 주파수 특성**

주파수 성분은 푸리에 변환을 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$E(f) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (6)$$

$$E_m(f) = \frac{E_{0m} \cdot k_m (\beta_m - \alpha_m)}{(j2\pi f + \alpha_m)(j2\pi f + \beta_m)} \cdot e^{-j\phi} \quad (7)$$

여기서  $m$ 은 1,2, $i$ , $j$ 가 되고,  $\phi$ 는 위상 이동(phase shift)으로  $E_1$ ,  $E_2$ 에서는 0이 되며,  $E_i$ ,  $E_j$ 에서는  $\phi = 2\pi f$ 가 된다. 주파수 영역에서의 스펙트럼 분포는 그림과 같이 나타난다.

**III. OFDM 시스템**

OFDM 시스템은 부반송과간의 직교성을 이용하여 광대역으로 통신이 이루어져 각 부반송과의 협대역 채널은 비선형적 채널로 근사화되어 시간간연과 잡음 영향을 덜 받게 되며 데이터 전송 성능이 획기적으로 향상된다[5]-[10].

OFDM 시스템의 재밍이나 간섭 영향의 완화방법으로 클러스터(cluster) 방식, 재밍의 영향을 받은 파일럿 부반송과 제거[7], 심볼의 반복으로 인한 영향 완화[8], 광대역

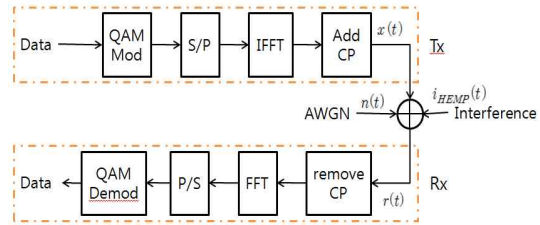


그림 4. 시스템 수신 모델  
**Fig. 4.** Receiver model of system.

을 그룹으로 나누어 같은 신호를 전송하는 방법[9],[10] 등이 있다. 본 논문에서는 HEMP도 광대역의 재밍으로 간주한다.

**3-1 수신 신호 모델**

해폭발이 발생한 상황에서 HEMP가 발생하여 시스템에 간섭으로 작용하는 경우를 고려하므로 채널은 이상적인 AWGN (additive white gaussian noise)의 고정 통신 방식으로 가정한 시스템 모델은 그림 4와 같다. 이때, 시스템의 수신신호는 다음과 같다.

$$r(t) = x(t) + n(t) + i_{HEMP}(t) \quad (8)$$

여기서  $x(t)$ 는 OFDM 송신신호,  $n(t)$ 는 AWGN,  $i_{HEMP}(t)$ 는 HEMP 간섭신호로 가정하며,  $x(t)$ 는 다음과 같다.

$$x(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-j\omega_k t} \quad (9)$$

여기서  $N$ 는 사용되는 부채널의 개수,  $X_k$ 는  $k$ 번째 부반송과 채널 송신 신호 레벨,  $\omega_k$ 는  $k$ 번째 부반송과 채널 주파수이다.

실제로 사용되는 반송과 주파수의 대역은 수 GHz에 해당되지만, 차폐물의 접지 및 차폐 등의 수단에 의해서도 차단되지 않고 신호 전달 매질과 수신 시스템을 통과하여 헤테로다인 수신기에 영향을 주는 전체 신호들이 해석의 대상이 된다. HEMP 간섭의  $E_2$ ,  $E_3$ 은 진폭이 작고, 주파수 대역이 낮으므로 배제하고, 간섭영향은  $E_1$ 으로 가정한다[10],[11]. 간섭신호는 광대역에 영향을 미치므로 시스템의 사용 대역 전체에 영향을 준다. 시스템에 미치는 영향이 AWGN과 같고, 다음과 같이 정의한다.

$$z(t) = n_0(t) + i_{HEMP}(t) \quad (10)$$

재밍 간섭신호의 확률분포는 다음과 같다.

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_n^2 + \sigma_{HEMP}^2)}} \exp\left(\frac{-z^2}{2(\sigma_n^2 + \sigma_{HEMP}^2)}\right) \quad (11)$$

여기서  $\sigma_n^2$ 은 AWGN의 분산,  $\sigma_{HEMP}^2$ 는 HEMP의 분산이며, PSD (power spectrum density)는 다음과 같다.

$$PSD_Z = N_0 + I_{HEMP} \quad (12)$$

여기서  $N_0$ 는 AWGN의 PSD,  $I_{HEMP}$ 는 HEMP의 PSD이다.

### 3-2 시스템 성능 분석

재밍 간섭이 작용한 경우의 SINR (signal to interference and noise ratio)인  $\lambda$ 는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{E_S}{N_0 + I_{HEMP}} \quad (13)$$

여기서  $E_S$ 는 OFDM 신호의 전력이다. 부반송파의 개수  $J$ 에 영향을 받는 OFDM 시스템의 BER 특성은 다음과 같다.

$$P_{OFDM} = \frac{\sqrt{M}-1}{\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{2^{\sqrt{J}}-1}{2^{\sqrt{J}-1}} \frac{3 \log_2 M}{2(M-1)} \lambda}\right) \quad (14)$$

여기서  $M$ 은 변조 계수,  $\operatorname{erfc}()$ 는 complementary error function이다.

### 3-3 Q-factor

Q-factor는 시스템의 선택도(quality factor)로 시스템의 주파수 선택 특성에 사용되는 지표로 다음과 같은 수식으로 정의된다.

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} = 2\pi \frac{\text{average energy stored}}{\text{energy loss/second}} \quad (15)$$

여기서  $f_r$ 은 공진주파수,  $f_1, f_2$ 는 3dB 대역폭에 해당되는 최저, 최고 주파수이다. Q가 시스템의 회로에 적용되면 회로 소자에 저장되는 에너지와 손실되는 에너지의 비에 주파수개념을 적용한 에너지양으로 접근되며 수식은 다음과 같다. Q값은 HEMP의  $E_1$  펄스의 시간상에서 상승시간과 지속시간에 미치는 영향을 상태로 다음과 같이 가정한다.

$$\alpha = a_1/Q, \quad \beta = b_1/Q \quad (16)$$

Q값에 의한  $I_{HEMP}(t)$ 는 다음의 수식으로 정리된다.

$$I_{HEMP}(t) = E_{01} \cdot k_1 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (17)$$

## IV. 프로그램에 의한 모의실험 및 검토

시스템은 16QAM 변조방식을 사용하고 64개의 부반송파를 사용하는 OFDM 시스템으로 HEMP 간섭과 AWGN이 존재하는 채널환경에서의 SNR (signal to noise ratio)이 10 dB인 경우에 통신이 이루어지는 경우, Q값과 ISR (interference to signal ratio)에 따른 시스템의 BER 성능을 프로그램으로 확인하였다.

$$ISR = \frac{I_{HEMP}}{E_S} \quad (18)$$

그림 5는 ISR의 크기에 따른 간섭의 영향을 나타낸 그림이다. Q값이 일정한 회로로 가정할 때, ISR의 크기가 0, 10, 20, 30 dB인 경우로 간섭 에너지가 클수록 회로소자에 손실 에너지보다 저장되는 에너지가 커지므로 회복시간이 길어졌다.

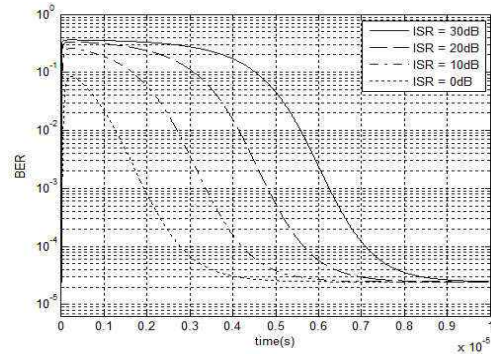


그림 5. ISR에 따른 BER 성능

Fig. 5. Performance by ISR.

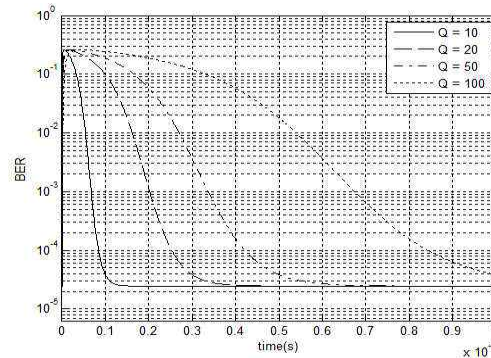


그림 6. Q값에 따른 BER 성능

Fig. 6. Performance by Q-factor.

그림 6은 Q값에 따른 성능변화를 보여준다. Q값은 10, 20, 50, 100 이다. ISR이 10 dB인 간섭영향을 받은 시점부터의 시간상에서 변화하는 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 각 회로별 다른 Q값을 갖는 부분의 간섭과라미터 ISR은 다음과 같이 정의한다.

지속시간 영향은 달라진다. Q값이 작은 경우, 사용대역 외의 주파수 대역을 포함하므로 HEMP의 지속시간보다 긴 시간동안 영향을 받지만, 회로소자의 손실에너지가 크므로 간섭으로부터의 회복이 빠르다. 반대로 Q값이 큰 경우, 사용 대역을 예리한 차단특성으로 선택할 수 있지만, 지속시간이 길어져 회복이 늦다.

여기서 이루어진 Q값과 ISR의 범위는 시스템 차폐에서 이루어지는 범위로 간주한 상태이며, 시스템 내부의 수동 회로 특성이나 능동 회로 동작 영향 및 대부분 사용되는 디지털 프로세서의 영향에 대해서는 별도의 추정 범위를 산정하지 못하였다. HEMP에 노출된 극단적인 상황에서의 시스템 파괴는 논의의 대상에서 제외함에 따라 2차적인 전자파 방호 및 차폐의 상황에서 시스템 회복 능력에 평가대상이 된다.

## V. 결 론

프로그램 실행 결과 Q값에 따른 시스템 회로의 전달 특성에 따라 크게 좌우되었다. 즉, HEMP가 시스템에 수신되었을 때, 높은 선택도가 요구되는 부분은 Q값이 크고, 회로에 저장되는 HEMP의 간섭 에너지에 따른 시간상에서의 손실에너지가 작아 간섭의 지속시간이 길어졌다. 반대로 선택도 요구가 큰 제약을 받지 않는 경우 손실에너지가 크므로 회복이 빨라졌다. 이는 부분적으로 높은 선택도가 요구되는 부분이 취약한 상태로 작용됨을 의미하며, 전반적인 시스템의 성능이 결정될 것으로 판단된다. 따라서 회로의 부분별 선택 특성을 고려하여 HEMP 방지 대책의 차등화가 요구된다.

또한 시스템의 선택도 Q는 단순히 회로의 R, L, C의 특성 이외에도 데이터 처리가 이루어지는 메모리 저장과 연산 장치의 지연 특성과도 관련되며, 시스템의 접지 및 차폐 특성과도 연관된다. 따라서 전반적인 선택 모델의 정성적 판단 기준 보다는 정량적 모델 설정이 이루어진 후에야 HEMP로부터 회복되는 정확한 영향 해석이 가능할 것으로 판단한다. 그러므로 Q값의 세부 판단 기준에 따라 HEMP 간섭에 대한 시스템의 영향을 완화시킬 수 있는 방안 수립도 계속적으로 이루어져 표준 규격 반영에 필요한 타당성 기반을 만들 수 있는 추후 연구 방향도 제시한다.

## 참고 문헌

- [1] N. Kim, and D. Y. Lee, Solutions for mitigating the potential damage by high altitude electromagnetic pulse of high power electromagnetic(HPPEM) caused by space weather variations, broadcasting and telecommunications policy study, Korea Communications Commission, 11-Jinheung-Na-18, 2011.
- [2] Newshankuk, After a nuclear explosion ⑥ EMP effect, [Internet]. Available: [http://www.newshankuk.com/news/content.asp?fs=8&ss=54&news\\_idx=201304051459051341](http://www.newshankuk.com/news/content.asp?fs=8&ss=54&news_idx=201304051459051341).
- [3] IEC 61000-1-5, Description of HEMP environment radiated disturbance, 1996.
- [4] CEI/IEC 1000-2-9, Electromagnetic compatibility(EMC), part2: Environment-section9: Description of HEMP environment radiated disturbance basic EMC publication, 1996.
- [5] J. V. Wyk, and L. Linde, "Bit error probability for a M-ary QAM OFDM-based system," in *2007 IEEE Africon: 8th Africon Conference*, Windhoek: South Africa, pp. 1-5, 2007.
- [6] B. Prasad, and B.S.Babu, "EMP effects on the performance of a direct sequence spread-spectrum communication system," *IEEE Transaction on Communications*, Vol. 32, Issue. 12, pp. 1251-1259, 1984.
- [7] M. Han, T. Yu, J. H. Kim, and K. C. Kwak, "An efficient channel estimation algorithm under narrow-band jamming for OFDM systems," in *IEEE Military Communications Conference 2006*, Washington: DC, pp. 1-6, 2006.
- [8] K. Ohno, and T. Ikegami, "An interference mitigation study for coexistence of DS-UWB and OFDM," in *IEEE 18th International Symposium PIMRC-2007*, pp. 1-5, 2007.
- [9] C. Xu, and S. Zhang, "A jam-resistant UWB-OFDM system for wireless communications," in *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, Wuhan, China, Vol. 1, pp. 288-291, 2005.
- [10] Y. J. Uang, and H. J. Sui, "Research of anti multitone jamming based on OFDM video transmission system," in *Informatics in Control, Automation and Robotics, 2nd International Asia Conference*, Wuhan: China, Vol. 2, pp. 25-28, 2010.
- [11] J. Luo, J. H. Andrian, and C. Zhou, "Bit error rate analysis of jamming for OFDM system," in *Wireless Telecommunication Symposium*, Pomona: CA, USA, pp. 1-8, 2007.



**성 윤 현 (Yun-Hyeon Seong)**

2011년 2월 : 국립 공주대학교 전기전자제어공학과 (공학석사)  
2011년 3월 ~ 현재 : ㈜ 네오피스 대리  
※ 관심분야 : HEMP, OFDM, LTE



**장 은 영 (Eun-Young Chang)**

1993년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)  
1991년 9월 ~ 현재 : 국립 공주대학교 전자공학과 교수  
※ 관심분야 : OFDM/MIMO, RFID, HEMP/EMI/EMC



**윤 석 범 (Seok-Beom Yoon)**

1993년 2월 : 건국대학교 전자공학과 (공학박사)  
1994년 4월 ~ 현재 : 공주대학교 광공학과 교수  
※ 관심분야 : 광소자 재료, 광응용 소자, 신재생에너지시스템