

BLT방정식을 이용한 고출력 전자파가 고주파 회로에 미치는 영향에 관한 연구

준회원 강원준*, 문상곤*, 김준호*, 정회원 천창율**, 정용식*

A Study for the effects of HPM on the RF circuit using BLT Equation

Wonjune Kang*, Sangkon Mun*, Junho Kim* *Associate Members*,
Changyul Cheon**, Youngseek Chung* *Regular Members*

요약

고출력 전자파는 발전소 혹은 통신시스템 등의 주요시설의 오동작을 유발할 수 있다. 이러한 이유로 주요한 시스템에서 고출력전자파의 영향분석은 군사분야뿐만 아니라 상용분야에서도 주요한 연구분야이다. 하지만 간단한 구조를 갖는 대상은 FEM, FDTD, MoM 등의 해석법을 이용하여 전자파 영향을 분석할 수 있으나 해석대상이 복잡한 구조를 갖는 경우는 컴퓨터의 용량 및 계산시간의 한계로 이러한 해석법의 적용이 어렵다. 본 논문에서는 해석대상의 간소화 및 전자기 토폴로지법에 기반한 외부 전자파간섭 영향분석 기법을 제안한다. 제안된 기법의 유용성을 보이기 위하여 RF회로에서 전자파 간섭영향 분석에 대해 적용한 결과를 FDTD 법의 결과와 비교하였다.

Key Words : HPM, Electromagnetic Topology, BLT Equation, RF circuit, Microstrip line

ABSTRACT

Electromagnetic(EM) waves generated by high power microwave (HPM) sources cause malfunctions on the important facilities such as power plants and communication systems. For this reason, the analysis of the HPM effects on the complex targets has been interested in the commercial area as well as the military area. In the simple structures, the EM effects can be analyzed with the various full wave analysis methods such as FEM, FDTD, MoM and etc. However, it is very difficult to apply these full wave analysis methods to the large complex targets due to the limitation of computer performance and the large computing time. In this paper, we propose a new method for the analysis of the effects of the EM waves based on the electromagnetic topology (EMT) by simplifying the model. In order to testify the proposed method, we apply the proposed method to the RF circuit using BLT equation based on the electromagnetic topology (EMT), and compare the results with those of FDTD.

1. 서론

고출력 전자파는 공항이나 발전소, 군사시설 등 주요시설의 전자장비에 전자파간섭을 통한 오동작이나

고장을 유발할 정도의 충분한 전력을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다¹⁾. 이러한 전자파간섭 특성을 이용한 전자폭탄 (Electronic Bomb)은 전자기펄스 (Electromagnetic Pulse)를 이용하여 인체에는 직접적

※ 이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임(No. 2009-0074348)

* 광운대학교 전파공학과(astin1983@naver.com), ** 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부

논문번호 : KICS2010-08-380, 접수일자 : 2010년 8월 6일, 최종논문접수일자 : 2010년 10월 15일

인 피해를 주지 않으면서 레이더 등의 전자장비에 높은 전류나 전압을 유기하여 오동작을 발생시킨다. 이때 대상모델의 외부 전자파간섭에 대한 영향을 분석하기 위해서는 전자장 해석이 필요하다. 단순한 구조의 회로나 시스템에서는 FDTD, FEM 등과 같은 full wave 수치해석법을 이용하여 전자파 영향을 해석하는 것이 가능하지만 복잡하고 규모가 큰 구조의 회로나 시스템의 경우 컴퓨터의 제한된 용량과 성능으로 위와 같은 수치해석법을 적용하기 어렵다. 이에 따라 크고 복잡한 시스템을 해석 할 수 있는 새로운 전자파 영향분석 해석법이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 EMT(Electromagnetic Topology)에 기반한 BLT방정식을 이용하여 고출력 전자파가 안테나를 포함한 고주파 회로에 미치는 영향을 해석할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

제안되는 해석법은 대상모델을 전자계의 특성에 따라 몇 개의 영역으로 분할한 후 간략한 네트워크로 구성한다. 이렇게 구성된 네트워크를 BLT 방정식으로 해석 하면 대상모델의 주요한 위치에서 전압, 전류 등의 결과를 유추할 수 있다.

기존의 EMT 해석법은 주로 외부에 노출된 케이블에 의한 간섭분석을 실시하였으나 본 연구에서는 마이크로스트립 선로상에서의 외부 전자파간섭의 분석을 위한 EMT해석법을 제안한다.

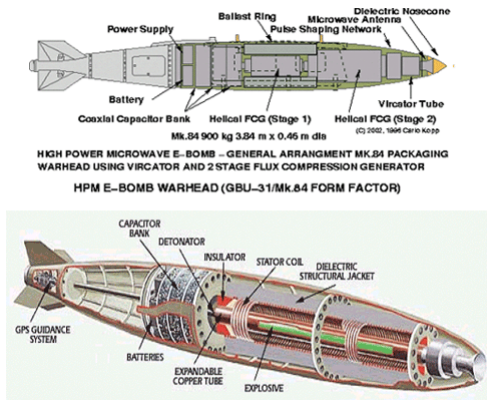


그림 1. 전자폭탄의 구조

II. EMT 해석법

Full wave 해석법은 해석대상을 작은 요소(element)로 분할하여 해석하기 때문에 임의의 구조에 적용이 가능하지만 해석대상의 크기가 크거나 구조가 복잡하면 분할된 요소의 수가 급격히 증가하여 제한

된 컴퓨터의 성능으로 해석이 어렵다. 이와 달리 EMT에 기반한 해석법은 복잡하고 규모가 큰 시스템 해석영역을 유사한 전자기적 topology를 갖는 영역이나 소자들로 나누어 간단한 EMT 네트워크로 표현하여 전자파영향을 해석하는 방식이다. 이때 EMT기법에 기반하여 구성된 네트워크를 해석하기 위하여 BLT방정식을 도입하는데 이 방정식은 Baum, Liu, Tesche 등이 제안하였다^{2,3)}.

EMT 해석법의 해석순서는 다음과 같다.

- 1) 해석영역을 분석하여 유사한 특성을 갖는 영역으로 분할한다.
- 2) 분할된 영역의 특성을 Junction과 Tube에 적용시킨다.
- 3) Junction과 Tube를 이용하여 네트워크를 구성한다.
- 4) BLT 방정식을 이용하여 EMT 네트워크를 해석하고 전압 및 전류 등의 결과를 구한다.

여기서 전자기적 topology는 해석영역의 형태에 따라 구분되는 Green 함수와 유사하다. 그러므로 주어진 해석영역을 자유공간, 안테나, 전송선로(동축 선로나 마이크로 스트립 선로) 그리고 저항 등의 회로소자로 분할 할 수 있다. Junction은 분할된 해석영역의 경계에 위치하게 되고 Tube는 Junction 간의 전자파 에너지 흐름의 통로가 된다. EMT 네트워크는 이러한 Junction과 Tube의 조합으로 이루어진다.

III. Topology Diagram의 구성

그림 2는 외부에서 전자파가 입사되었을 때 안테나와 마이크로스트립 회로를 나타낸 구성도이다. 외부에서 입사되는 전자파의 polarization은 다이폴 안테나와 마이크로 스트립 선로와 평행하다. 이는 외부 전자파가 안테나를 포함한 RF회로에 가장 큰 영향을 미칠

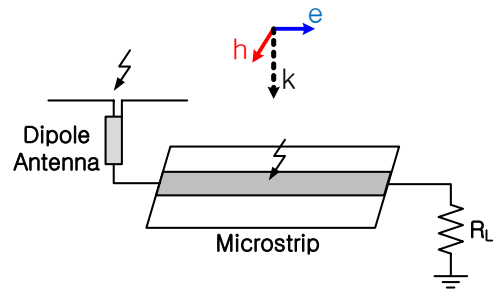


그림 2. 해석 모델 구성도

수 있음을 의미한다.

위의 해석 모델을 EMT 네트워크로 구성하기 위해서 각 회로에 대한 특성을 살펴볼 필요가 있다. 우선 외부의 전자파는 다이폴 안테나와 마이크로스트립 선로를 통해서 내부로 전자파의 에너지가 전달될 수 있으므로 이 부분이 EMT 네트워크의 전원(source)으로 모델링 된다. 다이폴 안테나는 안테나 부분과 뒤에 붙는 Coaxial 케이블로 나눌 수 있으며 마이크로 스트립 선로의 경우는 다이폴 안테나에서 Coaxial 케이블의 끝 부분과 저항 R_L 이 닿아 있다. 마지막으로 평면파 급전을 위하여 다이폴 안테나에서 무한히 떨어진 임의의 점 R_∞ 을 설정한다.

이는 다이폴 안테나와 입사파의 관계를 EMT로 나타내기 위해 사용하는 임의의 점이며 이 점에서는 다른 Junction에서 생기는 반사현상이 일어나지 않는다고 가정한다. R_∞ 을 포함하여 위와 같은 구조에서 각 시스템의 경계 부분을 나타내는 Junction은 그림 3과 같이 4개로 구성할 수 있다. 다이폴 안테나에서 무한히 떨어져 있다고 가정한 임의의 점(J1), 다이폴 안테나(J2), Coaxial 케이블과 마이크로 스트립 선로 사이의 경계(J3), 마지막으로 저항 R_L (J4) 이다. 또한 J1과 J2사이의 공간은 자유공간(free space)이며 J2와 J3 사이는 Coaxial케이블로 이루어져 있다. 그리고 J3와 J4 사이는 마이크로 스트립 선로로 모델링 될 수 있다.

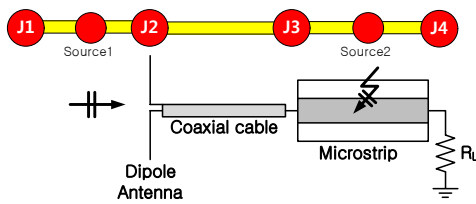
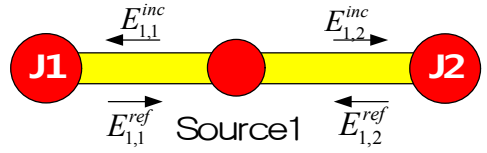


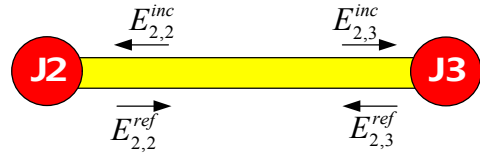
그림 3. 해석 모델의 Topology diagram

3.1 Propagation Matrix 구성

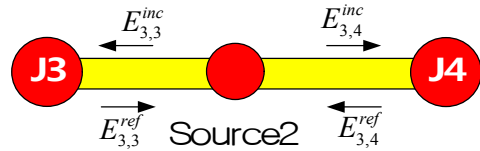
Propagation Matrix는 각각의 Tube에서 입사파와 반사파의 관계를 나타낸다. 이 해석 모델에서는 총 3개의 Tube가 있다. 각 Tube에서의 입사파, 반사파의 관계와 외부 전자파를 모델링 한 source는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림 4(a)에서 외부 전자파가 다이폴 안테나에 미치는 영향은 Pocklington's integral equation을 이용하여 모델링 하였다^[4]. 또한 그림 4(c)에서 Coaxial 케이블(J3) 과 저항 R_L (J4) 사이의 마이크로 스트립은 Tube 3로 나타냈다.



(a) 임의의 점(J1)과 다이폴 안테나(J2) 사이의 Tube 1



(b) 다이폴 안테나(J2)와 Coaxial 케이블의 끝점(J3) 사이의 Tube 2



(c) Coaxial 케이블(J3)과 저항 RL(J4) 사이의 Tube 3

그림 4. 각 Tube에서의 입사파와 반사파 관계

외부에서 입사된 전자파에 의해 마이크로 스트립에서 전계가 생성되는데 이는 참고문헌 [5]을 이용하여 모델링 하였다.

그림 4를 이용하여 모든 Tube에서 Propagation Matrix, 입사파, 반사파 사이의 관계를 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 G_f 는 자유공간 상의 Green 함수로 각 junction과의 관계를 나타내며 G_c 는 Coaxial 케이블에서의 관계를, G_{Ms} 는 마이크로 스트립과 연결된 junction들의 관계를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} E_{1,1}^{inc} \\ E_{1,2}^{inc} \\ E_{2,2}^{inc} \\ E_{2,3}^{inc} \\ E_{3,3}^{inc} \\ E_{3,4}^{inc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & G_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G_c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{Ms} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{Ms} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,1}^{ref} \\ E_{1,2}^{ref} \\ E_{2,2}^{ref} \\ E_{2,3}^{ref} \\ E_{3,3}^{ref} \\ E_{3,4}^{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E^{source1} \\ 0 \\ 0 \\ E^{source2} \\ E^{source2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

또한 외부에서 입사된 전자파가 다이폴 안테나와 마이크로 스트립 선로에 영향을 미치는 Source는 각각 Source 1과 Source 2로 나타내었다.

3.2 Scattering Matrix 구성

Scattering Matrix는 각 junction에서의 입사파와

반사파의 관계를 나타낸다. 그림 3에서 나타난 것처럼 junction은 총 4개가 있으며 junction에서의 Scattering Matrix는 반사계수를 의미한다. 그림 5는 각각의 junction에서의 입사파, 반사파 관계를 나타낸다. 그림 5 (a)의 경우 다이폴 안테나에서 무한히 떨어진 임의의 지점을 가정하였기 때문에 J1 에서는 아무런 반사도 일어나지 않는다. 그러나 그 외의 나머지 Junction 들은 각 소자의 접점이기 때문에 양단의 특성 임피던스 차이에 의하여 반사를 일으키게 된다.

그림 5의 각 Junction에서의 관계를 이용하여 (2)와 같이 Scattering Matrix, 입사파, 반사파 사이의 관계를 나타낼 수 있다. 여기서 ρ 는 junction에서의 반사계수와 투과계수를 의미하며 아래첨자 중에서 앞의 숫자는 Junction의 번호를 나타내며 뒤의 숫자는 각 junction에서 반사계수의 임의의 번호를 나타낸다. 시뮬레이션에서는 이상적인 상황을 고려하였으며 각 junction에서 입사파는 반사를 일으키지 않는다. 따라

서 $\rho_{2,2}, \rho_{2,3}, \rho_{3,2}, \rho_{3,3}$ 는 1 이며 나머지는 0의 값을 가진다.

$$\begin{bmatrix} E_{1,1}^{inc} \\ E_{1,2}^{inc} \\ E_{2,2}^{inc} \\ E_{2,3}^{inc} \\ E_{3,3}^{inc} \\ E_{3,4}^{inc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_{2,3} & \rho_{2,4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_{3,1} & \rho_{3,2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \rho_{3,3} & \rho_{3,4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rho_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1,1}^{ref} \\ E_{1,2}^{ref} \\ E_{2,2}^{ref} \\ E_{2,3}^{ref} \\ E_{3,3}^{ref} \\ E_{3,4}^{ref} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.3 EMT 네트워크에 BLT방정식의 적용

앞에서 구한 Propagation Equation과 Scattering Equation은 (3)과 (4)와 같은 형태로 나타낸다.

$$E^i = \Gamma E^r + E^s \quad (3)$$

$$E^r = S E^i \quad (4)$$

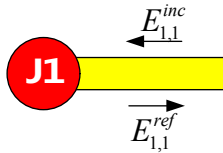
식(3)과 (4)를 이용하면 각 Junction에서의 Total Field를 구할 수 있으며 이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E^{tot} &= E^i + E^r \\ &= [1 + S][1 - \Gamma S]^{-1} E^s \end{aligned} \quad (5)$$

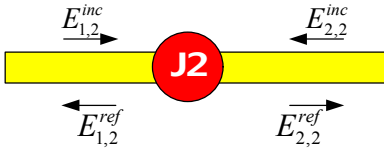
IV. 해석 모델의 시뮬레이션

본 논문에서 적용한 모델에서 다이폴 안테나 길이는 57mm이며 Coaxial 케이블의 길이는 55mm, 마이크로 스트립 선로의 길이는 150mm이다. 그리고 외부 전자파의 전계크기 E_0 는 1V/m이다. 또한 안테나와 스트립 선로가 외부 전자파의 전계방향과 일치하도록 설계가 되었으며 이는 외부에서 입사된 전자파가 회로에 가장 큰 영향을 미칠 수 있도록 하기 위함이다. 그림 6 에서 외부 전자파가 인가되었을 때 저항 R_L 에 걸리는 전압 값을 나타내었다. 이는 그림 3의 J4에서 total field를 나타내는 값이며 대부분의 주파수 영역에서 FDTD의 결과와 거의 유사한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 특히 공진주파수 부근에서는 EMT에 의한 해석결과가 FDTD의 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 그 외 주파수 대역에서 차이가 나는 이유는 실제모델의 구조를 EMT 해석 시 고려하지 않기 때문이다.

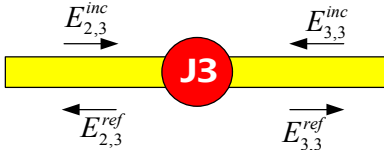
그림 7은 마이크로 스트립 선로가 외부 전자파의 영향을 받지 않을 때 저항 R_L 에 걸리는 전압 값을 나



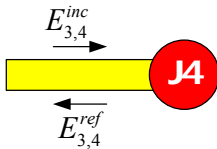
(a) Junction 1(임의의 점)에서의 입사파, 반사파 관계



(b) Junction 2(다이폴 안테나)에서의 입사파, 반사파 관계



(c) Junction 3(Coaxial 케이블의 끝점)에서의 입사파, 반사파 관계



(d) Junction 4(저항 RL)에서의 입사파, 반사파 관계

그림 5. 각 Junction에서의 입사파와 반사파 관계

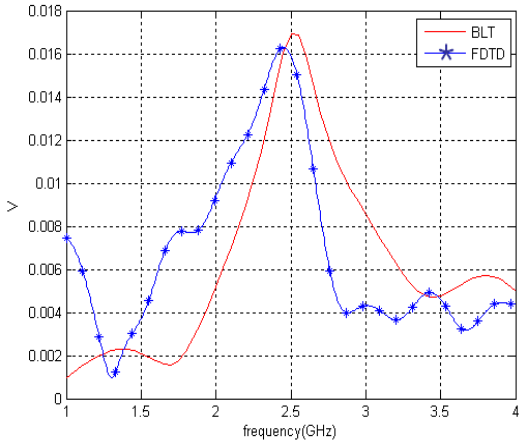


그림 6. 외부 전자파가 가해졌을 때 R_L 에서 걸리는 전압 값

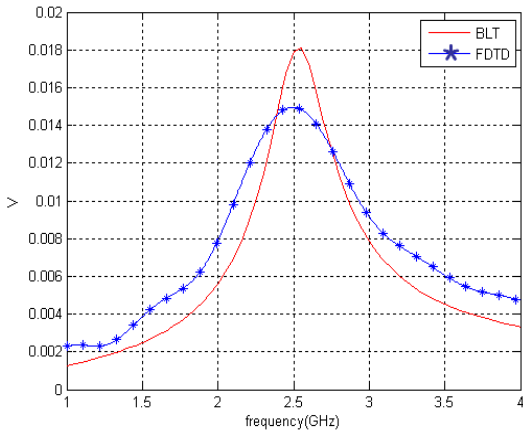


그림 7. 마이크로스트립 선로에 외부 전자파의 영향이 없을 때 R_L 에서 걸리는 전압 값

타낸 것이다. 또한 그림 7에서는 그림 6과 달리 두 해석법의 결과가 공진주파수 근방에서 차이가 남을 알 수 있는데 이는 BLT 방정식을 이용한 모델에서는 실제 모델의 미세한 차이를 고려하지 못하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 공진주파수를 제외한 대역에서는 두 해석결과가 어느 정도 일치함을 보여준다. 또한 그림 6과 그림 7의 결과를 비교 했을 때 차이가 발생하는 것을 발견할 수 있는데 이는 외부 전자파가 마이크로 스트립 선로에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 즉, 두 결과의 차이가 바로 마이크로 스트립 선로를 통해서 입사된 외부 전자파의 영향이라고 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 EMT 기법에 기반한 BLT 방정식을

이용하여 외부 전자파 입사에 의한 대상 내부의 영향을 분석할 수 있는 해석법을 제안하였다. EMT기법에 의한 전자파 영향해석은 해석영역을 유사한 전자기적 topology를 갖는 영역으로 분할하여 해석하는 기법으로 복잡하고 규모가 큰 해석모델에 적용할 수 있는 장점이 있다. 다만 이러한 모델링에 의하여 full wave 해석법 보다 해석의 정확성은 감소하나 해석특성의 주요한 패턴은 일치함을 앞선 연구들이 보였다.

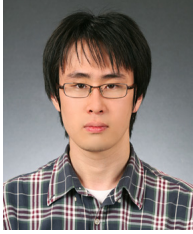
결과의 타당성을 보이기 위하여 안테나와 마이크로 스트립 선로가 들어간 회로해석에 적용하였다. 비교적 단순한 회로임에도 불구하고 FDTD를 사용한 경우 8분 19초의 해석 시간이 소요된 반면 BLT방정식을 이용한 경우 단지 10초만 소요되었으며 Intel Core2 Duo E6300의 CPU와 2GB의 RAM을 가진 사양의 컴퓨터에서 해석을 진행했다. 또한 해석결과는 주요한 특성부분에서 유사한 값을 나타냄을 보여 제안된 해석법의 유용성을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] W. A. Radasky, C. E. Baum, and M. W. Wik, "Introduction to the Special Issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)," IEEE Trans. on EMC., Vol.46, No.3, pp.314-321, 2004.
- [2] C. E. Baum, Electromagnetic Topology: A formal approach to the analysis and design of complex electronic systems, Interaction Notes 400, September, 1980.
- [3] F. M. Tesche, J. Keen, and C. M. Butler, Example of the Use of the BLT equation for EM field Propagation and Coupling Calculations, Interactions Notes 591, June 8, 2004.
- [4] Balanis, C. A., Antenna Theory: Analysis and Design 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2005.
- [5] Bernardi, P., "Response of a planar microstrip line excited by an external electromagnetic field," IEEE Trans. on EMC., Vol.32, No.2, pp. 98-105, 1990.

강 원 준 (Wonjune Kang)

준회원



2009년 2월 광운대학교 전파공학
학과(공학사)
2009년 3월~현재 광운대학교
전파공학과(공학석사)
<관심분야> 전자파수치해석 및
EMI/EMC 등

천 창 울 (Changyul Cheon)

정회원



1983년 2월 서울대학교 전기공
학과(공학사)
1985년 2월 서울대학교 전기공
학과(공학석사)
1992년 미국 University of
Michigan, Ann arbor(공학
박사)

1992년~1995년 강원대학교 전기공학과 조교수
1995년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부
정교수

<관심분야> RF, RF Power Amplifier, EMC 등

문 상 곤 (Sangkon Mun)

준회원



2009년 2월 광운대학교 전파공
학과(공학사)
2009년 3월~현재 광운대학교
전파공학과(공학석사)
<관심분야> EMI/EMC, RF 수
동소자 및 레이더 등

정 용 식 (Youngseek Chung)

정회원



1989년 2월 서울대학교 전기공
학과 (공학사)
1991년 2월 서울대학교 전기공
학과 (공학석사)
2000년 8월 서울대학교 전기공
학과 (공학박사)
2003년 3월~2006년 2월 명지

대학교 통신공학과 조교수
2006년 2월~현재 광운대학교 전파공학과 부교수
<관심분야> 전자파수치해석 및 EMI/EMC 등

김 준 호 (junho Kim)

준회원



2009년 2월 광운대학교 전파공
학과(공학사)
2010년 3월~현재 광운대학교
전파공학과(공학석사)
<관심분야> EMI/EMC, 레이
더 등