

논문 2019-56-6-2

원전 내 실내 전파 환경 모델링 및 분석

(Modeling and Analysis of Indoor Electromagnetic Wave in Nuclear Power Plants)

윤 상 운*, 박 중 언**, 장 도 영*, 주 재 율***, 이 준 용****, 추 호 성*****

(Sangwoon Youn, Jong-Eon Park, Doyoung Jang, Jaeyul Choo, Jun-Yong Lee[Ⓞ], and Hosung Choo)

요 약

본 논문에서는 원자력 발전소 내부의 실내 환경 조건에서 송신 안테나의 위치에 따른 배제 구역을 도출하여, 자유 공간 조건에서의 배제 구역과 비교 분석하였다. 실내 환경 조건에서 송신 안테나가 완전 도체로 이루어진 구조물에 가깝게 위치할수록 배제 구역의 최대 거리가 증가하였으며, 이를 통해 다양한 구조물이 포함된 원전 내부 실환경 조건에서의 배제 구역 연구가 추가적으로 필요함을 확인할 수 있다.

Abstract

In this paper, we derived an exclusion zone (EZ) according to the position of a transmitting antenna considering indoor environment of nuclear power plant (NPP) and compared it with the EZ of free space. As the transmitting antenna was located closer to metallic structures, the maximum distance of the EZ was increased. Based on the results, we have confirmed that further study of the EZ considering the NPP indoor environment is necessary.

Keyword : Exclusion zone, Field strength, Nuclear power plant, Wireless InSite

I. 서 론

최근 무선통신 기술이 고도로 발달함에 따라 원자력 발전소의 계측제어시스템에 무선 시스템을 적용하려는 시도가 이루어지고 있다^[1]. 해외 원전에서는 무선 시스템을 사용한 사례가 있으며^[2~3], 국내에는 화력 발전소에서 무선 시스템 적용에 따른 전자파 간섭 영향성에 대해 조사한 사례가 있다^[4]. 현재 원자력 발전소의 규제지

침 문서 Regulatory Guide 1.180^[5]에는 임의의 전자파에 의한 배제 구역(Exclusion zone)이 제안되어 있는데, 이 배제 구역은 자유 공간을 가정하여 도출하였다^[5]. 하지만 실제 원전 내 전파 환경을 고려하면, 내부 구조물에 의한 산란으로 균일하지 않은 전자파 분포가 형성된다. 따라서 자유 공간이 아닌 실내 전파 환경 조건에서의 배제 구역을 도출하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 원전 실내 환경을 모델링하여 전자파

* 학생회원, ***** 정회원 홍익대학교 전자전기공학과(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

** 정회원, 홍익대학교 메타물질전자소자연구센터(Metamaterial Electronic Device Research Center, Hongik University)

*** 정회원, 한국원자력안전기술원 계측전기평가실

(Dept. of Instrument, Control, and Electrical System, Korean Institute of Nuclear Safety)

**** 평생회원, 홍익대학교 컴퓨터공학부(School of Information and Computer Engineering, Hongik University)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail : jlee@hongik.ac.kr)

※ This research was supported in part by the Nuclear Safety Research Program through the Korea Foundation Of Nuclear Safety (KoFONS) granted financial resource from the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea (No. 1805006-0118-SB110) and in part by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2015R1A6A1A03031833).

Received ; January 15, 2019

Revised ; May 2, 2019

Accepted ; May 13, 2019

분포를 확인하며, 실제 환경 조건이 고려된 배제 구역과 최대 거리를 계산한다. 먼저 완전도체의 정육면체 구조의 크기를 변화시키기에 따라 형성되는 배제 구역이 자유 공간에서의 배제 구역과 다르다는 것을 확인한다. 다음으로 원전과 유사한 실내 환경을 Wireless InSite^[6]라는 시뮬레이터를 통해 모델링하고, 송신안테나의 위치에 따라 전자파 분포를 해석한다. 또한 송신안테나의 위치에 따라 배제 구역과 최대 거리를 계산하여 송신안테나가 피해야하는 위치를 도출한다. 마지막으로 측정을 통해 이론값과 실험값의 유사함을 통해 본 연구의 유효성을 확인한다. 본 연구를 통해 자유 공간에서의 배제 구역과 원전 실내 환경이 고려된 배제 구역이 다르게 나타남을 확인할 수 있으며, 복잡하고 다양한 구조를 지닌 원전 내부 환경에 대한 배제 구역 연구의 필요성을 확인할 수 있다.

II. 배제 구역 및 실내 환경의 3차원 모델링

그림 1은 자유공간에 송신안테나가 있는 경우와 완전도체로 이루어진 정육면체 공간 내부에 송신안테나가 있는 경우에 대해서 배제 구역을 비교해 본 결과이다. 배제구역은 식 (1)로부터 최소거리 d 에 의해서 결정되는데, 이 때 최소거리 d 는 앞서 언급한 원자력 발전소의 규제 지침 문서 Regulatory Guide 1.180^[5]에 정의되어 있다. 아래의 최소거리 d 수식에 시뮬레이션 조건에 맞게 P_t , G_t , E 값을 설정하면 최소거리 $d = 1.5$ m 가 계산된다. 따라서 자유공간에서 배제구역은 송신안테나를 중심으로 최소거리 1.5 m 반지름에 해당하는 원의 면적 내부가 된다. 다시 말해 임의의 무선기기로부터 1.5 m 반경 이내에 어떠한 계측제어장비도 배치하지 말 것을 권장하는 것이다.

$$d = \frac{\sqrt{30P_t G_t}}{E} \quad (1)$$

위 수식에서 변수 P_t 와 G_t 는 각각 송신 안테나의 방사세기와 안테나 이득에 해당하고, E 는 수신 안테나에서 허용 가능한 전계강도 세기를 나타낸다. 따라서 배제 구역은 송신 안테나로부터 최소거리 d 의 외부로 정의된다. 따라서 계측제어장비와 같이 전파에 취약한 기기들은 배제구역 범위 밖에 위치해야 한다.

먼저 송신안테나는 2.4 GHz의 동작주파수와 0 dBm의 출력세기를 갖는 송신안테나를 Wireless InSite 툴에 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 송신 안테나로는 반

파장 다이폴 안테나를 사용하였으며, xy 평면의 모든 방향으로 균일한 이득의 무지향성 방사패턴을 갖게 된다. 앞서 설정한 송신안테나를 자유공간에 위치시키고, 송신안테나와 동일한 평면에 수신안테나를 배열하여 각 위치에 도달하는 전파의 세기를 확인해 보았다. 다음으로는 6면이 완전 도체로 이루어진 공간 내부에 송신안테나를 위치시키고 동일한 조건으로 시뮬레이션을 진행하여 배제 구역을 확인해보았다. 그림 1에서 알 수 있듯이 공간의 체적 변이에 따라 다른 크기의 배제 구역이 도출되는데, 특히 제한된 공간의 체적이 작을수록 자유공간에서의 배제 구역과 확연히 다르게 나타나는 것을 알 수 있다. 실내 공간이 넓을수록 자유 공간과 비슷한 환경이 형성되어 전파의 반사 및 산란에 의한 영향이 적기 때문에 자유 공간에서의 배제 구역과 차이가 크지 않다. 반대로 공간이 좁아질수록 다중 반사에 의해 전자기파의 세기가 강해지는 부분이 점차 넓어지며, 이에 따라 배제 구역이 확대되는 효과가 나타난다.

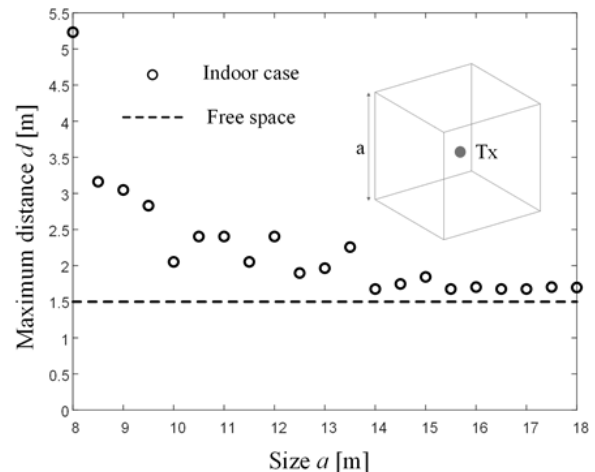


그림 1. 변수 a 의 변화에 따른 실내 배제 구역의 변화
Fig. 1. Variation of the indoor exclusion zone according to the variable a .

그림 2(a)는 측정환경으로 홍익대학교의 홍문관 919호에 해당하는 실험실이다. 그림 2(b)는 그림 2(a)를 Wireless InSite 시뮬레이터 상으로 모사한 것으로 송신안테나에 의한 배제 구역을 도출하기 위해 모델링한 실내 공간을 위에서 바라본 모습이다. 가로, 세로의 크기는 8.3 m, 8.93 m이고 공간의 내부에는 완전 도체로 이루어진 가로, 세로 2.70 m, 4.13 m 크기인 대형 철제 캐비닛이 존재한다. 그림 2(c)는 모델링한 실내 공간을 사선으로 바라본 모습을 나타낸다. 시뮬레이션에서 반영된 재질 중 콘크리트와 유리는 손실을 포함한 비유전율 값을 적용하였으며 그 값은 각각 $7+j0.016$, 2.4 이다. 손실 항

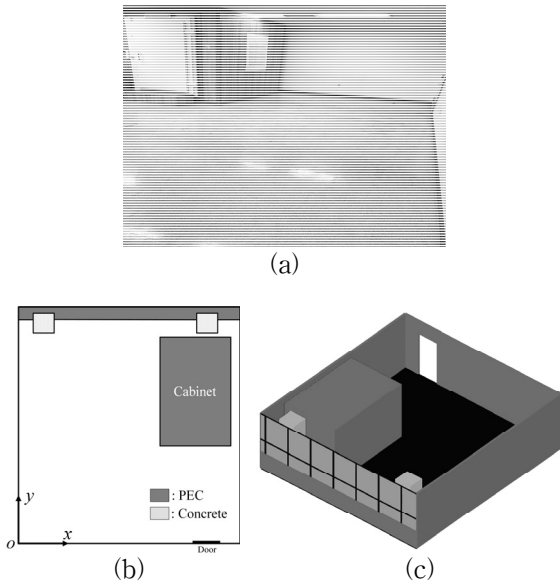


그림 2. Wireless InSite로 모델링한 실내 구조
Fig. 2. Modeling of the indoor geometry by Wireless InSite.

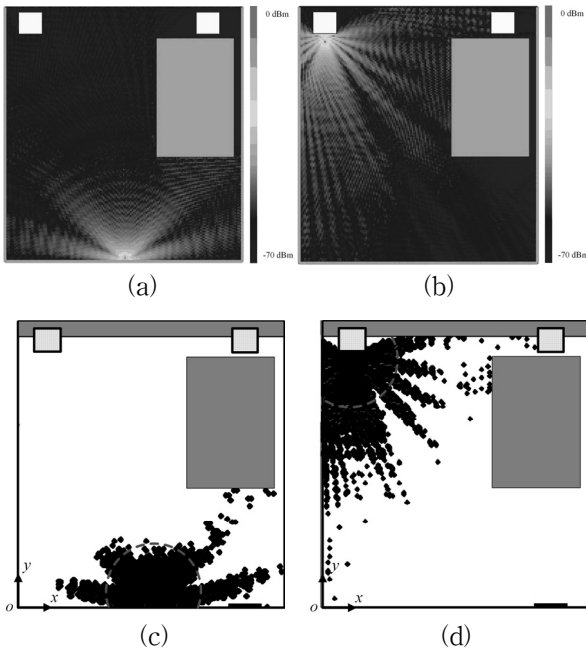


그림 3. 송신 안테나 위치에 따른 전력 분포와 배제 구역
Fig. 3. Power distributions and exclusion zones according to the position of the Tx antenna.

까지 반영하여 실제 재질을 더욱 잘 모사하였고, 시뮬레이션 및 측정 결과 사이의 오차를 줄이고자 하였다.

그림 3(a), (b)는 앞서 모델링한 실내 공간에서 송신 안테나의 위치에 대한 전력 분포를 나타낸다. 그림 3(a)에서 송신안테나의 위치는 (0.9 m, 7.7 m, 1.4 m)이고, 그림 3(b)에서 송신안테나의 위치는 (4.2 m, 0.125 m, 1.4 m)이다. 그림 3(c)는 그림 3(a)의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 배제 구역을 검정색 영역으로 나타내었으

며, 붉은 색 점선은 자유 공간에서의 배제 구역을 의미한다. 규제지침 문서^[5]에 따르면 배제 구역은 전계강도 4 V/m를 기준으로 산출한다. 이를 본 연구에 적용하면, 4 V/m인 전계강도 기준값은 환산된 수신 전력으로 약 -49 dBm이 되며 이를 기준으로 그림 3(c)와 그림 3(d)와 같이 배제구역을 도출하였다. 그림 3(a)와 그림 3(b)에서는 보이는 바와 같이 대형 철제 캐비닛과 내벽 사이에서 다중 반사가 일어나며 정재파가 생성되는 것을 확인할 수 있다.

III. 원전 실내 환경에서 배제 구역

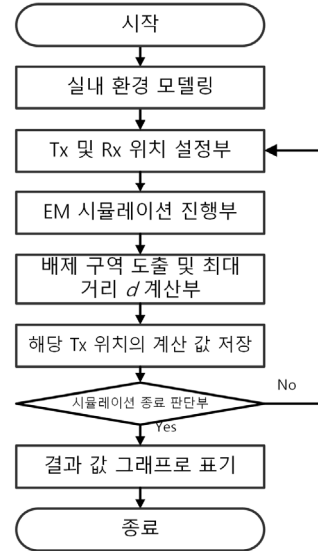


그림 4. 배제 구역 도출을 위한 순서도
Fig. 4. Flow chart of the procedure for obtaining the exclusion zone.

그림 4는 모델링한 실내 환경에 대해서 송신안테나의 위치에 따른 실내 환경 배제 구역(계산된 배제 구역의 최대 거리 d)을 도출하는 순서도를 보여준다. 먼저, Wireless InSite 시뮬레이션툴을 사용하여 원전 실내 환경을 모델링하였다. 그리고 수신안테나를 일정한 간격으로 배치하고, 송신안테나의 시작 위치를 설정한 후 일정하게 이동할 간격을 지정해 준다. 설정이 완료되면 시뮬레이션을 진행하고, 전력 계산 결과에 따라 실내 환경 배제 구역인 최대 거리 d를 계산한다. 이 과정을 송신안테나의 모든 위치에 대해서 반복한다.

그림 5는 그림 4의 과정을 통해 각 송신안테나의 위치에 대해서 계산된 실내 환경 배제 구역 d를 나타낸다. 색이 붉은색에 가까울수록 배제 구역 d의 길이가 길다는 것을 의미한다. 실내 환경에서 기동과 철제 캐비닛에

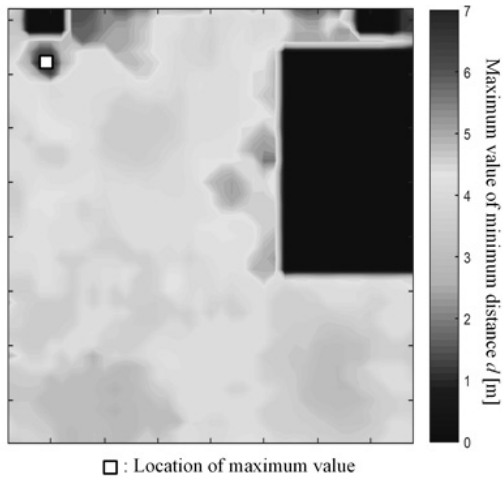


그림 5. 송신안테나 위치에 따른 실내 배제 구역의 최대 거리

Fig. 5. Maximum distance of indoor exclusion zone according to the position of the Tx antenna.

가까울수록 붉은 색으로 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 실내 구조에서 송신안테나가 산란체 주변에 위치하게 되면 배제 구역 d 가 길게 나타나고, 완전 도체 재질의 구조물에 대해서 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 따라서 실내 전파 환경에서 안테나를 설치할 경우, 가능한 완전 도체 재질의 구조물과 멀리 설치하는 것이 다른 무선기기와의 간섭을 최소화할 수 있음을 확인하였다.

그림 6은 모델링한 실내 환경에서 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 시뮬레이션 상의 송신안테나 위치와 동일하게 두고 측정을 진행하여 시뮬레이션 해석 결과에 대한 타당성을 검증하였다. 2.4 GHz 주파수에서 동작하는 모노폴 안테나를 송, 수신으로 각각 사용하였고, 각 안테나를 손실이 약 5 dB 인 3 m 케이블로 연결하여 진행하였다. 케이블에 대한 손실은 측정 데이터에서 양 케이블의 전체 손실 값인 10 dB의 보정 값으로 보상하여 비교 분석하였다. 두 안테나는 전자파에 대한 영향성이 적은 스티로폼 재질의 받침대 위에 위치시켜 1.4 m 높이에서 측정을 진행하였다. 또한 전자파 측정 장비로는 하나의 장비에서 송신과 수신 이 모두 가능한 스펙트럼 분석기(MS2720T Anritsu corporation)를 사용하여, 두 가지 측정 장비에 대한 교정(calibration) 과정을 생략함으로써 측정 오차를 줄일 수 있었다. 그림 6(a)는 그림 3(a)의 송신안테나 위치(녹색 점)으로부터 반지름(r)이 1.5 m인 경로를 따라 수신안테나(점선)를 배치한 그림이다. 그림 6(b)는 그림 6(a)에서 수신안테나의 경로에 따른 수신 전력의 시뮬레이션 결과와 측정

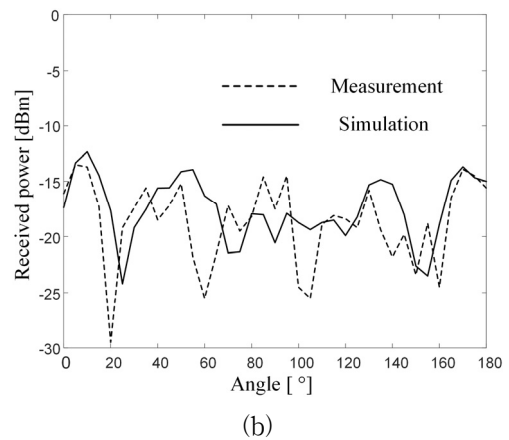
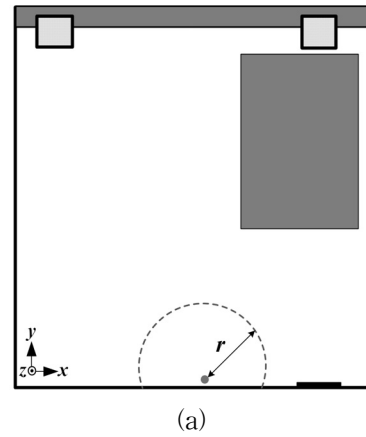


그림 6. 측정 및 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 6. Comparison between measurement and simulation results.

결과를 비교한 것이다. 반원을 따라 수신 전력을 확인한 것은 송신안테나 (임의의 무선 기기)로부터 같은 거리만큼 떨어져 있더라도 방사되는 방향에 따라 수신 전력의 값이 달라지기 때문이다. 이러한 점이 자유공간과 구별되는 점이며, 본 연구의 목적이기도 하다. 또한 그림 6(a)의 점선 상에서 수신 안테나가 위치하는 왼쪽 부분이 상대적으로 개방되어 있으며, 오른쪽 부분이 철제 캐비닛에 의해 막혀 있다. 이로부터 그림 3(c)에서와 같이 오른쪽 부분에서 배제 구역이 더 넓게 형성되는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 x 축을 따르는 아래쪽 콘크리트 벽면과 철제 캐비닛 사이에 정재파가 형성되어 더욱 강한 전력 분포가 나타나는 것으로 확인된다. 그림 6(b)에서도 미약하게나마 오른쪽 부분이 약간 더 강하게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 원자력 발전소 내부 실내 환경이 주어졌을 때 배제 구역이 자유 공간에서의 배제 구역과 차이

가 나는 것을 확인했으며, 원전 실내 환경을 모델링하여 임의의 송신 안테나에 의한 전력 분포를 통해 배제구역을 분석해 보았다. 실내 환경 조건에서의 배제 구역이 자유 공간에서의 배제 구역에 비해 넓게 나타나는 것을 확인하였고, 송신안테나가 완전 도체로 이루어진 구조물에 가까울수록 배제 구역의 최대 거리가 증가함을 확인하였다. 마지막으로 측정을 통해 시뮬레이션 및 측정값이 유사함을 확인하였다.

REFERENCES

[1] 구인수, 황인구, “원자력발전소의 디지털 계측제어 계통에 대한 전자파 장애 및 대책”, 대한전기협회 전기저널, 301, pp. 37-41, 2002년 1월.

[2] P. F. Keebler and H. S. Berger, “Managing the use of wireless devices in nuclear power plants,” IN Compliance, Nov. 2011.
 [3] S.-H. Ye, Y.-S. Kim, H.-S. Lyou, M.-S. Kim, and J. Lyou, “Verification of electromagnetic effects from wireless devices in operating nuclear power plants,” Nuclear Engineering and Technology, vol. 47, no. 2015, pp. 729-737, Aug. 2015.
 [4] J. K. Lee, “Adopting wireless technology in NPP I&C system,” in Proceedings of the Nuclear Procurement Issues Committee 2011, pp. 13-14, Gyeongju, Korea, 2011.
 [5] Nuclear Regulatory Commission, “Guidelines for evaluating electromagnetic and radio-frequency interference in safety-related instrumentation,” Regulatory Guide 1.180, Office of nuclear regulatory research, 2003.
 [6] <http://www.remcom.com/wireless-insite>, Remcom: Wireless InSite, 2018.

저 자 소 개



윤 상 운(학생회원)
 2019년 홍익대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
 2019년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 석사 과정

<주관심분야: GPS 안테나, 방향탐지와 안티 재밍 응용분야, EMC & EMI>



박 종 언(정회원)
 2006년 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 학사 졸업.
 2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 석사 졸업.
 2013년 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 박사 졸업.

2013년~2015년 미국 오하이오 주립대학교 박사후 연구원 근무

2016년~현재 홍익대학교 메타물질전자소자연구센터 연구교수

<주관심분야: 전자파 산란, 안테나 설계, EMI & EMC 해석, 개구 투과 현상 분석 등>



장 도 영(학생회원)
 2015년 동양미래대학교 정보통신학과(공학전문학사)
 2015년~2018년 모아소프트 RF/EMC 사업부 연구원
 2018년 동양미래대학교 정보통신학과(공학사)

2018년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 석사과정
 <주관심분야: 방향 탐지용 안테나 설계 및 배열 최적화, 전파 환경 분석>



주 재 울(정회원)
 2004년 홍익대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
 2006년 홍익대학교 전자전기공학부 석사 졸업.
 2006년~2010년 LS산전 연구원 재직

2014년 카이스트 전자전기공학부 박사 졸업.
 2014년~현재 원자력안전기술원 연구원 재직.
 <주관심분야: RFID tag, flip-chip 패키징 전기적 분석, 비아에 대한 전자기적 필드 분석, 전송선로, 반사구조에 대한 전자파 간섭문제>

— 저 자 소 개 —



이 준 용(평생회원)-교신저자
1986년 서울대학교 컴퓨터공학과
졸업.
1988년 Univ of Minnesota 컴퓨터
공학과 석사 졸업.
1996년 Univ of Minnesota 컴퓨터
공학과 박사 졸업.

1996년~1997년 미국 IBM Staff 연구원 근무
1997년~현재 홍익대학교 정보컴퓨터공학과 교수
<주관심분야: 컴퓨터시스템 응용, 임베디드 시스
템, 실시간 프로세싱 등>



추 호 성(정회원)
1998년 한양대학교 전파공학과
졸업.
2000년 University of Texas at
Austin 전자전기공학과 석사
졸업.

2003년 University of Texas at Austin 전자전기
공학과 박사 졸업.

2003년~현재 홍익대학교 전자전기공학과 교수
<주관심분야: 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을
이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나 등>