

3차원 광선추적(Ray tracing)법을 이용한 실내 전파(傳播)특성 분석

채규수^{1*}, 임중수¹
¹백석대학교 정보통신학부

A Study of Indoor Radio Wave Propagation using 3D Ray Tracing Method

Gyoo-Soo Chae^{1*}, Joong-Soo Lim¹

¹Division of Information Communication, Baekseok University

요약 본 논문에서는 3차원 광선추적 기법을 이용한 실내 환경에서의 전파특성 분석을 위한 3D 시뮬레이터를 이용한 분석 결과를 제시하였다. 지금까지 소개된 대부분의 전파특성 분석 결과들은 2차원 평면에서 거리에 따른 신호의 손실(Path Loss) 위주로 연구가 진행 되었다. 본 연구에서는 실내에서 전파특성을 분석하기 위해 다양한 ITU 모델을 사용하여 입체구조의 실내 환경에서 전파의 수신신호의 세기에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구에서 개발된 시뮬레이터를 이용해 150MHz와 2GHz대역의 손실 특성이 비교 되었고 예상한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 각 수신기의 위치에서 수신 신호는 전파경로상의 벽면에서 손실되는 전력에 따라 차이가 생기기 때문에 송신기의 출력이 중요한 요인으로 분석되었다.

Abstract In this study, we present the investigation results using a 3D radio wave propagation simulator in indoor environments. Previous studies treat only the path loss between the transmitter and receiver in 2D geometry. We provide the simulation results of indoor propagation prediction based on various ITU-R Recommendations. Simulation results compared here indicate that 150MHz and 2GHz frequency bands give quite different characteristics in presented indoor geometry. Since the field intensity is affected by the loss at the wall, the transmitting power level is one of the key factor for receiving power.

Key Words : Wave propagation, Radio wave, Indoor, Path loss, Simulation, ITU-R

1. 서론

최근 들어 이동통신의 서비스 영역이 작아지면서 실내에서도 셀을 설계해야 하는 경우가 많아지고 있다. 실내에서 전자파의 전파(propagation)특성 해석은 이동통신 분야에서 주로 진행 되었고 1980년대 초 미국에서 실내 환경에서 전파의 경로 손실에 대한 연구가 처음 시도 되었다[1-13]. 실내 환경은 일반적인 외부 환경과 차이가 많아서 이동통신에서 사용하는 실외 전파예측에 사용되는 통계적인 모델을 사용하여 일률적으로 적용하기 힘들

다. 그리고 지면과 수면의 다중경로 반사에 의한 수신전계 변화에 대한 연구가 주로 실외 환경에서 이루어 졌다 [8]. 이동통신 분야에서는 다중경로에 대한 고려는 하지만 반사면의 반사계수에 따른 송신 전력의 변화에 대한 연구가 대부분이었다. 최근에는 3D 하이브리드 기법이 소개 되어 2차원 위주의 전파환경 분석 기법이 3차원으로 확대 되어 좀 더 정확한 방법을 제시하고 있다[14-15].

또한 단일 안테나 수신전력 기반 도래방향 추정 방법에 관한 연구도 일부 이동통신 기지국이나 WLAN 중계

Received 2014-3-31 Revised 2014-5-1 Accepted 2014-6-1

*교신저자 : Gyoo-Soo Chae(gschaeb@bu.ac.kr)

기 설치 위치 결정 등의 용도로 진행 되었다. 그리고 신호호대 방향에 대한 연구는 군용 레이더의 회진방향 탐지 기술 위주로 개발되었고 상업용으로는 RFID 태그를 부착한 상품의 방향을 추적하는 제품이 출시되어 있으나 정확한 측위를 위한 구체적인 연구는 거의 없었다.

그리고 휴대용 측정 방법에 대한 기술이 소개 된 경우는 있으나 전파도래 방향 추정 방법이 배열 안테나를 사용하는 경우에 대한 내용 위주로 소개되어 있다.

본 연구에서는 실내 환경에서 무선망 설계 및 분석을 위한 마이크로 셀용 전파(propagation) 분석 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 시뮬레이션은 사용자가 Auto CAD를 이용하여 직접 도면과 같이 전파 환경을 도식화 하고 프로그래밍 언어를 통해 전파 분석 모델을 구현하여 분석하였다. 일반적인 전파(propagation) 예측 방법은 이론적 예측 방법과 통계적 예측 방법을 이용하여 분석하는데 이론적 예측 방법은 반사, 투과, 회절 등에 의해 수신기에 도달 가능한 전파 경로를 추적하여 그 신호 세기를 구하는 방법으로서 예측 결과가 매우 정확할 뿐 아니라 지연, 확산, 데이터 전송률 등 광대역 전파 특성을 분석할 수 있는 장점이 있으나 계산 속도가 느리다는 단점이 있다. 통계적 예측 방법은 여러 가지 전파환경에서 측정 시스템에 의한 측정 데이터를 분석한 결과를 이용하여 만든 전파 예측 알고리즘에 따라 수신 신호 세기를 예측하는 방법으로서 예측 결과의 정확성은 다소 떨어지나 신속하게 예측 결과를 얻을 수 있다는 점에서 유용하다.

2. 본 론

본 연구에서는 통계적 예측 알고리즘을 이용하여 일부 구간에서의 측정 데이터와 예측 데이터를 비교하여 계산된 오차를 예측 알고리즘 보정 값을 이용함으로써 분석을 원하는 지역에서 보다 정확한 예측 데이터를 얻을 수 있는 최적의 예측 방법을 이용하였다. 본 연구에서 예측할 수 있는 전파 전파 특성으로는 무선 통신 시스템에 따른 수신 신호 세기, 시스템 특성에 따른 서비스 영역의 결정, 페이딩 특성에 따른 통신 성능 분석, 시스템 대역폭에 따른 지연 현상 분석 및 데이터 전송률 결정, 안테나 지향 특성 및 각도에 따른 서비스 영역 결정 등으로서 요구되는 각 파라미터들을 이용할 뿐 아니라 건물, 문과 같은 건축 환경에 속한 재질, 두께 등을 함께 분석

하도록 한다.

2.1 전파모델

가. 3차원 광선추적(Ray tracing)법

무선통신 시스템에서 수신 안테나에 도달하는 신호는 송신된 전자파와 무선통신 환경의 상호작용을 통해 결정되는 여러 다중경로 신호 성분의 합의 형태로서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$h(t) = \sum_{n=1}^N A_n \delta(t - \tau_n) e^{-j\theta_n} \quad (1)$$

여기에서 송신된 임펄스 신호는 수학적으로 Dirac Delta 함수로 표현되었고, 수신된 신호 $h(t)$ 는 각각의 경로에 따른 손실과 위상 변화를 겪은 시간 지연 신호들의 벡터 합의 형태이다. 이와 같은 모델링은 각각의 다중경로에 대해 수신 안테나에 도달할 때의 손실과 지연시간, 위상 변화를 설명할 수 있다.

영상법을 이용하여 각 반사점과 광선의 입사 면과 반사면을 모두 구할 수 있으므로, 각각의 경로에 대한 수신 안테나에서의 유기전압을 구할 수 있다. 송신 안테나로부터 수신 안테나로 유기 되는 전압은 식 (2)와 같이 행렬 곱의 형태로 표현할 수 있다.

$$V_i = G_T G_R \frac{e^{-j\beta r_d}}{r_d} R_{loss} D_{loss} \Phi_N \cdot \Phi_R \quad (2)$$

여기에서 G_T 와 G_R 는 각각 송수신 안테나의 3차원 이득 패턴 행렬이고 r_d 는 다중경로의 각 경로에 대한 길이, R_{loss} 와 D_{loss} 는 반사와 회절 점에서의 손실, Φ_N 과 Φ_R 은 각각 수신 안테나에 도달하는 신호들의 편파 벡터와 수신 안테나의 편파 벡터 행렬을 나타낸다. 식 (2)의 모든 행렬 값들은 신호의 입사 및 반사각과 반사 및 회절면의 전기적 특성에 대한 함수이다. 이와 같은 방법을 통하여 송수신 안테나의 위치와 종류 및 편파에 따른 채널의 임펄스 응답을 구할 수 있다.

나. 유전체 공동 모델

영상법을 이용한 광선추적법은 모든 벽면과 실내 구조물을 반사체로 가정하여 각 송신 안테나의 위치에 따

른 영상안테나의 위치를 구해내는 방법이다. 직육면체구조의 실내전파환경은 유전체공동(cavity)으로 모델링될 수 있는데, 영상안테나의 좌표를 구하기 위해, 우선 원래의 공동에 대한 영상공동의 상대적인 좌표를 결정한 후, 각각의 영상 공동 안에 있는 영상안테나의 좌표를 구한다. 실내 환경을 가시영역과 비가시 영역으로 나누어, 가시영역에서는 영상안테나를 이용하여 무한개까지의 전파 경로를 구할 수 있는 유전체 공동모델을 사용하였고, 비가시 영역에서는 두 개의 유전체 공동이 접합된 변형된 유전체 공동모델을 사용하였다. 여기서 유전체 공동 모델은 가시영역에서 직접파와 반사파만을 고려하여 전파 특성을 해석하는 모델이며, 변형된 유전체 공동 모델은 비가시 영역에서 회절파를 고려한 모델이다. 회절파를 해석하기 위해 UTD(Uniform geometrical Theory of Diffraction)를 이용하여 다중 반사를 거친 뒤에 회절모서리로 입사하고, 회절모서리에서 회절된 후 다중 반사를 거쳐 수신 안테나로 입사하는 반사-회절-반사파를 계산하였다. 최대 반사차수는 수신 전력이 수렴하는 값으로 결정하고, 이를 채널의 임펄스 응답 발생 시 사용하였다.

다. 경로추적 알고리즘

수신 안테나에서의 전계를 구하기 위해, 각각의 영상 안테나에서 수신 안테나까지의 반사점, 반사면에 수직인 단위벡터 및 입사 면에 수직인 단위벡터를 계산한다. 각각은 입사각 계산과 입사 전계를 평행 및 수직 성분으로 분해하는데 필요하다. 전파경로를 따라 반사점을 구하고, 각 반사점에서의 재질별 전기적 특성과 입사각 그리고 반사점에서 입사하는 전계의 수평 및 수직 성분으로 반사손실과 편파변화를 구한다. 이 모든 데이터들은 행렬의 형태로 저장되고 여기에 개개의 경로에 해당하는 자유공간손실과 송수신 안테나의 이득과 편파 등이 병렬 연산되기 때문에 빠른 속도로 복소 채널 임펄스 응답을 구할 수 있게 된다.

그림 1은 가시영역과 비 가시영역에서 광선의 경로를 보여주고 있다. 그림 1(a)에서는 가시영역에서 전파가 세 번 반사된다고 가정 할 때의 광선 경로를 보여주고 있다. 일반적인 사무실이나 건물에서의 전파환경은 육면체 형태의 유전체 모델로 모델링이 가능하다. 그림 1(b)에서는 비 가시영역에서의 전파 경로를 보여주고 있다. 이 경우에는 반사된 전파가 수신단으로 전달되기 때문에 수신 레벨이 매우 약하게 된다. 이 육면체 형태의 구조에 대해

각 면에 전하는 영상공동을 가정하며, 반사 횟수에 따라 영상공동의 개수를 확장하게 된다. 각 영상공동에 대해, 송신 안테나의 벽면에 대한 영상 안테나의 좌표를 구하고, 이를 수신 안테나와 연결하여 전파경로를 추적하게 된다. 이와 같이 모든 면에 대한 영상공동을 이용하므로 3차원상의 수신 경로를 모두 추적할 수 있다.

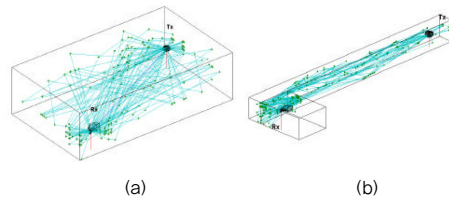


그림 1. 가시영역과 비 가시영역에서 광선의 경로

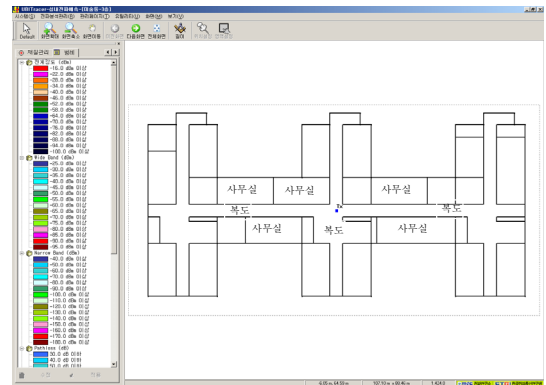


그림 2. 실내 전파환경 분석 구조(2D 도면)

그림 2에서는 실내 전파 환경 분석 2D 구조를 나타내었다. 분석을 위한 송수신 안테나 파라미터와 시뮬레이션 방법이 표 1에 제시되었다. 안테나는 등방성 이며 높이는 3m, 편파는 수직편파, 송신 출력은 1W, 안테나 이득은 0dB, 기타손실은 0dB로 설정하였다. 여기서 안테나의 출력은 가시선 영역의 직접파와 벽면을 통과한 간접파의 전파특성에 상당한 영향을 줄 것으로 예상된다. 그림 3에서는 전파환경 분석 시뮬레이터 화면 파라미터 입력 화면 구성을 보여주고 있다. 시뮬레이터는 분석정보 입력 화면과 3D도면을 보여주는 화면으로 구분되어 있다. 시뮬레이션을 위한 송수신 점들이 선정되면 먼저 그림에서 제시된 것과 같이 도면에서 가능한 전파 경로가 모두 표시된다. 전파 분석 모델은 ITU-R에서 권고하는 모델을 적용하였다. 특히 일반적인 분석 모델들은 단거리의 옥내용이 아니며 옥내용에서는 건물의 재질, 두께,

복도의 위치 등의 환경적인 요건에 민감하게 반응하므로 기 개발된 일반 모델을 기준으로 본 연구에 적합한 마이크로 셀용 수정 모델을 개발하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

구분	값
주파수	150MHz
송수신안테나	등방성
송수신안테나 이득	0dB
송신전력	0dBm
기타경로 손실	0dB
편파	수직
안테나 높이	3m
시뮬레이션 방법	3D Ray tracing

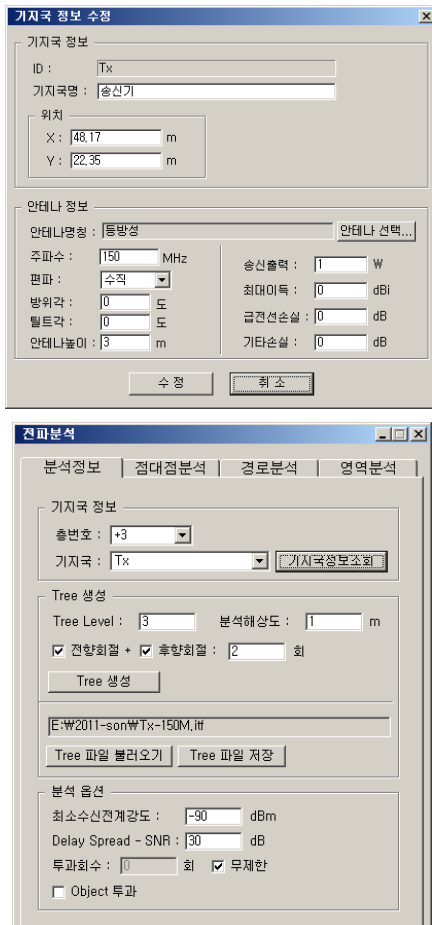


그림 3. 송신기 및 분석 조건 설정 화면

2.2 시뮬레이션 결과

그림 4에서는 송수신기 간의 전파특성 분석 경로를 보여주고 있다. 송수신기 간의 일정 간격에서 수신신호의

세기(RSSI: Received Signal Strength Indication)를 분석하였다. 표 2와 3에서 150MHz와 2GHz에서의 수신전계 분석 결과를 보여주고 있다.

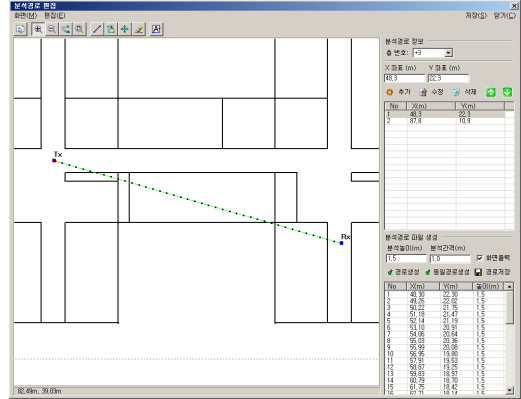


그림 4. 실내 전파특성 분석 경로

표 2. 수신전계 전파특성 결과(@150MHz)

No	X	Y	Z	RSSI (dBm)	Path loss(dB)	거리 (m)
10	52.62	21.05	1	-0.02	30.03	5.05
20	57.43	19.67	1	-27.8	57.82	9.85
23	58.87	19.25	1	-41.97	71.98	11.32
31	62.71	18.14	1	-40.97	70.98	15.27
45	69.44	16.2	1	-28.73	58.74	22.23
71	81.93	12.59	1	-62.71	92.72	35.2
78	85.29	11.62	1	-60.06	90.07	38.69
84	87.8	10.9	1	-41.46	71.47	41.3

표 3. 수신전계 전파특성 결과(@2GHz)

No	X	Y	Z	RSSI (dBm)	Path loss(dB)	거리 (m)
10	52.62	21.05	1	-22.52	30.03	5.05
20	57.43	19.67	1	-52.96	57.82	9.85
23	58.87	19.25	1	-59.97	71.98	11.32
31	62.71	18.14	1	-54.19	70.98	15.27
45	69.44	16.2	1	-53.94	58.74	22.23
71	81.93	12.59	1	-77.26	92.72	35.2
78	85.29	11.62	1	-100.02	90.07	38.69
84	87.8	10.9	1	-98.99	71.47	41.3

그림 5에서는 본 연구에서 제안한 구조의 건물 내에서 특정한 사무실을 선정하여 사무실 문이 열려 있는 경우를 가정하여 송신 신호의 세기를 분석하기 위한 도면을 보여주고 있다. 그리고 특성 분석을 위한 송신신호 세기를 계산하기 위한 각 분석 위치를 보여주고 있다.

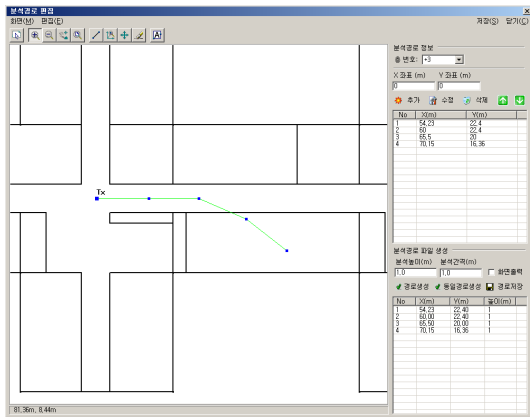


그림 5. 사무실 문이 있는 경우 전파특성 분석 경로

그림 6에서는 그림 5의 구조에서 150MHz에서 문이 있는 사무실의 송신신호 분석결과이다. 벽면의 재질, 반사계수, 송신 출력에 따라 사무실 내부에서의 수신신호는 다소 차이가 날 수 있다.

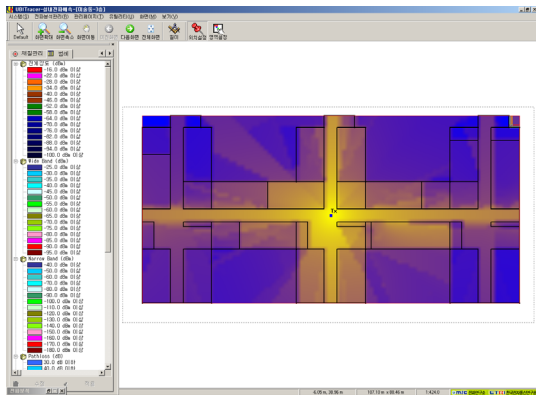


그림 6. 사무실 문이 있는 경우 실내 전파특성 분석 특성 (@150MHz)

3. 결론

본 연구에 실내 전파환경 분석을 위해 건물의 실제 설계 단면도를 사용하여 광선추적 기법을 이용하여 전파특성을 분석 하였다. 본 연구는 실내 전파환경에서 도래방향 추정 오차분석을 위한 사전 연구로 진행 되었으며 실내 전파환경 분석 결과에서도 벽면에서의 반사와 회절에 의한 수신 전계의 변화가 큰 것으로 나타났다. 선행 연구 결과에서도 다중경로에 의한 도래방향 예측 오차가 상당히 큰 것을 알려져 있다.

실내전파환경 분석과 신호원 위치 추정은 복잡한 전파환경 때문에 적절한 결론을 도출하기가 어렵다. 그리고 송수신 안테나 간의 단순한 실내 전파 환경의 문제가 아닌 외부에 다른 방향 신호원이 있는 경우에는 더 복잡한 문제를 야기 시킨다. 향후 보다 정밀한 RF 신호원 추정을 위해 개선된 방안을 제안 하고자 한다.

참고문헌

- [1] E. Tsalolihin, I. Bilik, N. Blaunstein, S. Shakya, "Analysis of AOA-TOA Signal Distribution in Indoor Environments," Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 1646-1650, April 2011.
- [2] Carl Wong, R. Klukas, G. G. Messier, "Using WLAN Infrastructure for Angle-of-Arrival Indoor User Location," IEEE 68th Vehicular Technology Conference, 2008. VTC 2008-Fall. pp. 1-5, Sept. 2008.
- [3] T. Hasegawa, Y. Iwamoto, M. Omiya, "Simulation method of wireless LAN indoor propagation using FDTD technique and MATLAB/simulink," IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 4132-4135, June 2007.
- [4] Rappaport, T. S., Wireless Communications Principles and Practice, IEEE Press, New York, 2002.
- [5] J. D. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, John Wiley & Sons Ltd., 2000.
- [6] Hans-Jurgen Zepemick, Tadeusz A. Wysocki, "Multipath channel parameter for the indoor radio at 2.4GHz ISM band," IEEE 49th Vehicular Technology Conference, vol. 1, pp. 190-193, 1999.
- [7] Jonas Medbo, Hallenberg Henrik, Jan Erik Berg, "Propagation characteristics at 5GHz in typical radio-LAN scenarios," 1999 IEEE 49th Vehicular Technology Conference, vol.1, pp. 185-189, 1999.
- [8] Leandro Juan-Llacer, Luis Ramos, Narcis Cardona, "Application of some theoretical models for coverage prediction in macrocell urban environments," IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol. 48, No. 5, pp. 1463-1468, September 1999.
- [9] Chang-Fa Yang, Member IEEE, Boau-Cheng Wu, and Chuen-Jyi Ko, "A Ray-Tracing Method for Modeling Indoor Wave Propagation and Penetration," IEEE Trans. on Antennas and Propagat., pp. 907-919, vol. 46, no. 6, June

1998.

[10] John Doble, Introduction to radio propagation for fixed and mobile communications, Artech House, INC, 1996.

[11] G. T. Martin, M. Faulkner, M.A. Beach, "Wide Band Propagation Measurements and Ray Tracing Simulations at 1890MHz," Proceedings of the 1995 4th IEEE International Conference on Universal personal Communications, pp. 283-287, 1995.

[12] U. Dersch and E. Zollinger, "Propagation mechanisms in microcell and indoor environments," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, pp. 1058 - 1066, Nov. 1994.

[13] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 43, pp. 879 - 891, Nov. 1994.

[14] W. Honcharenko, H. L. Dailing, and J. Dailing, "Mechanisms governing propagation between different floors in buildings," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 41, pp. 787 - 790, June 1993.

[15] G. E. Athanasiadou, J. P. McGeehan, "A new 3D Indoor ray-Tracing Propagation Model with particular reference to the prediction of power and delay spread," Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Vol. 3, pp. 1161-1165, 1995.

저 자 소 개

채 규 수(Gyoo-Soo Chae) [정회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2000년 2월 : Virginia Tech 전기공학과(공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2003년 2월 : Amphenol Mobile, RF manager
- 2003년 2월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
<관심분야> : 초고주파 소자, 안테나 설계

임 중 수(Joong-Soo Lm)

[정회원]



- 1987년 8월 : 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1994년 3월 : Auburn University (공학박사)
- 1980년 8월~2003년 2월 : 국방과학연구소
- 2003년 3월 ~ 현재 : 백석대학교 정보통신학부 교수
<관심분야> : 전자파 이론, 광대역 주파수 소자 설계, 레이더 및 전자전 장비 설계/분석