

# 경사면을 갖는 반-협곡 구조에서 다중-광선 모델을 사용한 전파 모델 해석

이화춘\* · 최태일\*\*

## An Analysis of Propagation Model in Half-Canyon Structure with Slope using Multi-Ray Model

Hwa-Choon Lee\* · Tae-Il Choi\*\*

### 요 약

다중-광선 모델을 이용하여 경사면을 갖는 반-협곡 구조에서 전파 전송 손실을 해석하고 경사면의 각도에 따라 나타나는 다중-광선 전파 모델을 공식화 하였다. 경사면의 기울어진 각도에 의해 결정되는 송수신 전파의 경사면 반사경로인 제3경로와 제4경로에 대한 차단 각도를 송수신 단말의 높이와 위치를 가지고 계산하였다. 경사면 환경에서 전파 전송 손실을 예측하기 위하여 실제 경사면이 존재하는 제방 환경을 선택하여 모델링하고 시뮬레이션 하여 전파 전송 손실을 계산하였으며, 주파수 1-6GHz 대역에 대한 측정활동을 통해 전파 전송 손실을 확인하였다. 시뮬레이션 결과와 측정 결과는 유사한 전파 전송 손실 경향을 보여주었으며 다양한 지형정보에 대한 전파 경로 손실 예측과 측정 결과들은 다양한 전파 업무 설계에 활용될 수 있다.

### ABSTRACT

A multi-ray model has been used to interpret radio transmission losses in half-canyon structures with slope and to formulate a multi-ray propagation model depending on the angle of slopes. The cut-off angles for the third and fourth paths, which are the slope-sided reflection paths of the transmission and reception radio waves determined by the inclined angles of the slope, were calculated with the height and location of the transmitter and receiver. To predict transmission losses in an inclined plane environment, the embankment environment where the actual slope exists was modeled and simulated to calculate the loss of propagation transmission, and the radio wave transmission loss was confirmed by the measurement for the frequency band 1 to 6 GHz. Simulation results and measurement results showed similar trends in radio transmission loss, and radio transmission loss predictions and measurement results for various terrain information can be used in the design of radio propagation service.

### 키워드

Half-canyon structure, Multi-ray model, Propagation prediction, Transmission loss  
반-협곡 구조, 다중-광선 모델, 전파 예측, 전송 손실

\* 교신저자 : 조선대학교 전자공학과

\*\* 광주여자대학교 보건행정학과(sk@kwu.ac.kr)

• 접수 일 : 2019. 12. 17

• 수정완료일 : 2020. 01. 16

• 게재확정일 : 2020. 02. 15

• Received : Dec. 17, 2019, Revised : Jan. 16, 2020, Accepted : Feb. 15, 2020

• Corresponding Author : Hwa-Choon Lee

Dept. Electronic Engineering, Chosun University,

Email : orut00@naver.com

I. 서 론

광선 추적 모델은 개방된 지역과 건물 밀집 지역의 협곡 구조에서 전파를 예측하는 데 광범위하게 사용되어 왔다[1]. 광선 추적 모델 접근 방식은 주변의 환경에 따라 필요한 만큼의 광선 경로를 쉽게 추가하여 확장할 수 있다[2]. 그러나 복잡한 도시 협곡 구조의 전파 모델에서는 회절과 반사의 영향을 고려하기가 매우 어렵다. 따라서 도심 복합 구조에 대한 전파 모델을 단순화하기 위한 알고리즘이 제안되었고[3], 모든 표면이 평평하고 매끄러운 것으로 가정되고[4] 모서리의 영향을 고려한 단순화된 모델이 제안되었으며[5], 기하학적 광학에 기초한 전파 모델[6]이 제안되었다.

국제 표준 권고서 ITU-RP.1411에서는 구석 영역을 새롭게 정의하고 환경에 따라 구석의 손실을 고려하는 경로 손실 계산 공식을 공식화했다[7]. 최근에는 도시 협곡의 구조물에 대한 주파수 추적 손실 모델이 제안되었다[8]. 그러나 반 협곡 구조[9] 또는 협곡 구조의 벽이 기울어져 있는 경우[10]에 대한 연구는 매우 드물게 나타나고 있다.

본 논문에서는 제방이나 완만한 산간 지역과 같은 반 협곡 구조의 지형에서 전파의 전송 손실을 계산하기 위한 다중 경로 모델을 공식화 하였다. 반 협곡 구조에 나타나는 4개의 전파 경로는 직접파 및 지면 반사파와 측면의 경사면에 의해 두 개의 전파 경로가 추가로 정의되며, 다중 광선 추적 모델의 기본 공식에서 수정된 공식으로 반 협곡 구조에 적용된다. 경사면에 의해 발생하는 세 번째 및 네 번째 경로에 대한 차단 각도는 송수신 안테나의 높이와 위치에 기초하여 정의된다. 실제 시뮬레이션과 측정을 위하여 새만금 방조제를 반 협곡 구조의 전파 환경으로 선택하였으며, 주파수 1-6GHz 대역에 대하여 시뮬레이션 계산 값과 측정 결과를 비교하여 전파 전송 손실을 분석하였다. 본 논문의 제2장에서는 경사면을 갖는 반협곡 구조에서 송수신기 사이의 링크에 대한 전파 경로를 정의하고 수신 전력의 계산식을 공식화 하였으며, 경사면 기울기에 대한 경사면 반사파의 컷-오프 각도를 계산하였다. 제3장에서는 새만금 방조제에서 측정된 주파수 대역별 경로손실과 시뮬레이션 모델의 계산 결과와 비교하여 분석하였다. 제4장에서는 결론

과 함께 본 논문의 결과의 활용 방안을 서술하였다.

II. 다중 광선 추적 모델

2.1 two-ray 모델

다중 광선 추적 방법의 기본 모델을 그림1에서 보여주고 있다. 직접파와 지면 반사파에 의해 송수신 단말 사이의 링크가 이루어지고 있다. 이 때 수신 전력은 식(1)에 의해 나타낼 수 있다. 여기에서  $\lambda$ 는 파장이고,  $G_t$ 와  $G_r$ 은 각각 송수신기의 이득이고,  $\Gamma$ 는 지면의 반사계수 이다. 그리고  $l_1$ 과  $l_2$ 는 각각 그림에서 경로1과 경로2의 길이를 나타내는데 경로1은 직접파의 거리이고 경로2는 지면 반사파의 거리이다. 이 때  $l_1$ 과  $l_2$ 는 송수신기의 높이에 의해서 결정된다.

$$E_r = \sqrt{(G_t G_r)} \frac{\lambda}{4\pi} \left( \frac{\exp(j2\pi l_1/\lambda)}{l_1} + \Gamma \frac{\exp(j2\pi l_2/\lambda)}{l_2} \right) \quad (1)$$

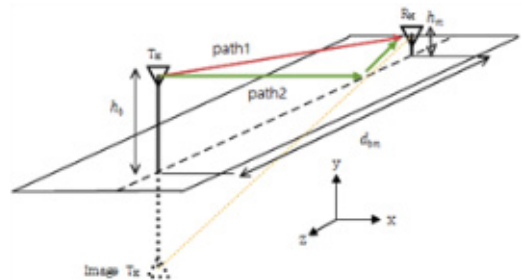


그림 1. 전형적인 2-광선 모델 구조  
Fig. 1 Typical geometry of 2-ray model.

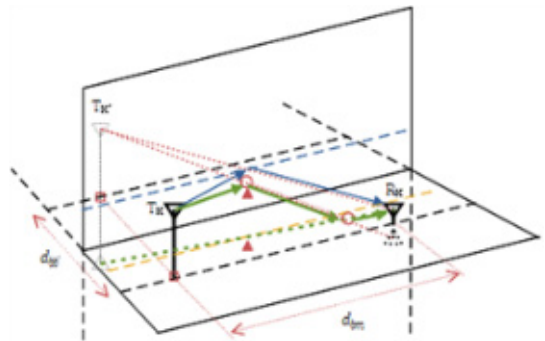


그림 2. 수직 벽을 가진 반-협곡의 기하학적 구조  
Fig. 2 Geometry of half-canyon structure with vertical wall

그림2에서는 수직 측면 벽에 의해 송수신기 사이에 두 개의 새로운 링크가 설정된 것을 볼 수 있다. 이때 생성된 경로3과 경로4는 벽면에 대칭인 Tx의 이미지인 Tx'와 실제인 Rx 사이에 다시 각각 2-광선 모델의 경로가 형성된 것임을 보여주고 있다. 단지 경로1 및 경로2와의 차이는 수직 벽면에 의한 반사를 포함하고 있다는 것이다. 경로3은 벽면 반사를 포함하고 있고 경로4는 벽면 반사와 지면 반사를 모두 포함하는 경로이다. 그러므로 그림2에서 보여주는 4개의 경로에 의한 수신 전력은 식(1)에 경로3과 경로4의 영향을 추가하여 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$E_r = \sqrt{(G_t G_r)} \frac{\lambda}{4\pi} \left( \frac{\exp(j2\pi l_1/\lambda)}{l_1} + \Gamma_b \frac{\exp(j2\pi l_2/\lambda)}{l_2} + \Gamma_s \frac{\exp(j2\pi l_3/\lambda)}{l_3} + \Gamma_s \Gamma_b \frac{\exp(j2\pi l_4/\lambda)}{l_4} \right) \quad (2)$$

식(2)에서  $l_3$ 와  $l_4$ 는 Tx의 수직 벽면에 의한 이미지 Tx'와 Rx 사이의 경로3과 경로4의 거리이다. 이때  $l_3$ 와  $l_4$ 는 송수신기의 높이 및 벽면으로부터의 거리에 의해서 결정된다. 그리고  $\Gamma_b$ 와  $\Gamma_s$ 는 각각 지면과 수직 벽면에 의한 반사계수를 나타내는데, 경로3은 벽면 반사가 존재하고 경로4는 벽면반사와 지면반사가 함께 존재하는 것을 알 수 있다.

### 2.2 기울기를 갖는 반-협곡 구조

그림3(a)에서는 수직 벽면이  $\Delta\phi$ 만큼 회전한 것을 보여주고 있다. 이 경우에  $\Delta\phi$ 의 값이 커질수록 벽면 반사 경로인 경로3과 경로4의 벽면 반사 지점(붉은색 화살표)가 점차 낮아지게 된다. 그리고 벽면에 의해 발생하는 Tx의 이미지 Tx'의 높이 또한 변하기 때문에 벽면 반사에 의한 경로 해석을 하는 것이 어려워진다. 또한 수직 벽면이  $\Delta\phi$ 만큼 회전하면 영상 이미지 Tx'는  $2\Delta\phi$ 만큼 회전하게 된다. 그러므로 그림3(b)와 같이 수직 벽면을 고정하고 지면을 반대 방향으로  $\Delta\phi$ 만큼 회전시켜서 해석하는 것이 용이하다. 이 경우에도  $-\Delta\phi$ 가 증가하면서 벽면의 반사 위치가 점차 낮아지지만 수직면 대칭으로 해석할 수 있어서 쉽게 공식화가 가능하다.

그림3에서  $\Delta\phi$ 가 증가하면 경사면을 따라 경로3과 경로4의 경사면의 반사지점이 점차 낮아지다가 회전

중심축과 일치하게 되면 반사 경로가 사라지게 된다.  $\Delta\phi$ 의 증가에 따라 경로4와 경로3의 순서로 사라지게 되는데 이 경우에는 송수신기 사이의 링크 수가 4개에서 3개와 2개의 차례로 감소하게 된다. 수직 벽면이 기울어지면서 반사 경로가 없어지면 송수신기의 링크는 2-광선 모델로 다시 돌아오게 된다. 그러나 실제 환경에서는 경사면이 완전도체가 아니므로 산란과 회절에 영향을 받게 된다. 그러므로 정확한 시뮬레이션을 위해서는 경사면의 재질에 대한 전기적 특성 및 지형의 구조적 변화를 엄밀하게 설정한 모델을 구현하여야 한다.

$$\Delta\phi_{cut-off}^{path3} = \frac{(\phi_b + \phi_m)}{2} \quad (3)$$

$$\Delta\phi_{cut-off}^{path4} = \frac{(\phi_b - \phi_m)}{2} \quad (4)$$

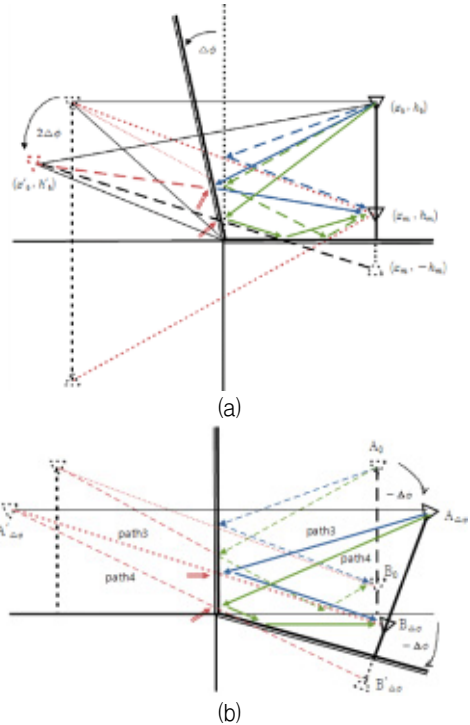


그림 3. 반-협곡 구조의 기하학적 모형  
(a) 경사 구조 (b) (a)의 등가 모형  
Fig. 3 Geometry of half-canyon structure  
(a) Sloping structure (b) Equivalent geometry of (a).

식(3)과 식(4)에서  $\phi_b$ 와  $\phi_m$ 은 경사면의 회전축 중심에서 본 송수신 단말의 위치를 각으로 표시한 것이다.

$$\phi_b = \tan^{-1}\left(\frac{h_b}{x_b}\right) \quad (5)$$

$$\phi_m = \tan^{-1}\left(\frac{h_m}{x_m}\right) \quad (6)$$

여기에서  $h_b$ 와  $h_m$ 은 각각 송수신기의 높이이고,  $x_b$ 와  $x_m$ 은 회전축 중심에서 각각 송수신기까지의 거리이다.

### III. 시뮬레이션 및 측정 결과 검토

경사면을 갖는 환경에 대한 전파 전송 손실을 계산하고 측정하기 위하여 새만금 방조제를 선정하였다. 비교적 전파 측정이 용이하고 전파 예측 모델을 적용하여 비교하기 적절한 환경으로 판단되었다.

그림4에서 보여주는 것과 같이 경사면 아래 10미터 폭의 포장된 도로가 있고, 그림의 우측은 낮고 넓은 잔디 구역이며, 제방 위에는 포장된 4차선 도로가 놓여 있다. 전체 도로 길이가 수km에 해당하지만 실제 측정과 모델 계산은 약1-1.5km에서 진행되었다. 단 제방의 높이는 약7-8m, 기울기는 약30도인데 높이와 경사가 측정 범위 내에서 일정하지 않았다[11].

송수신기는 모두 무지향성 안테나를 사용하였고, 이득은 주파수 1-6GHz의 대역에서 약5.5-14dBi 이고, 송수신기 사이에 V-편파를 설정하였다. 또한 송신기의 높이는 10미터이고 수신기의 높이는 1.5미터 이다. 수신점은 송신점 부터 100미터 간격으로 1.5킬로미터까지 설정하였고, 주파수 대역은 1-6GHz까지 0.5GHz 간격으로 측정하였다. 그림5는 새만금 방조제를 시뮬레이션 모델로 구성한 것이다. 특히 우측 부분에서는 잔디 구역과 갯벌 부분의 바닷물 영역이 실제 환경을 구현하기 어려우므로 임의로 설정하였다. 그림5의 시뮬레이션 모델에 대하여 1-6GHz까지 수신점 50미터 간격으로 시뮬레이션을 실행한 결과를 그림6에서 보여주고 있다. 송수신 안테나 이득을 0dBi로 설정하고 송수신기 사이의 전송 손실을 계산한 결과인데, 측정 결과에 대해서도 안테나 이득을 고려하여 시뮬레이션 값과 비교하였다.

그림6에서 보여주는 시뮬레이션 결과는 전형적인

2-광선 모델 결과를 보여주고 있다. 넓은 개활지이고 제방의 높이가 송신안테나의 높이 10미터 보다 낮고, 경사의 경사도가 완만하기 때문에 경사면에 의한 영향이 많지 않은 것으로 나타났다고 판단된다.



그림 4. 새만금 방조제 경사면 환경 사진

Fig. 4 A picture of the slope of Saemangeum seawall

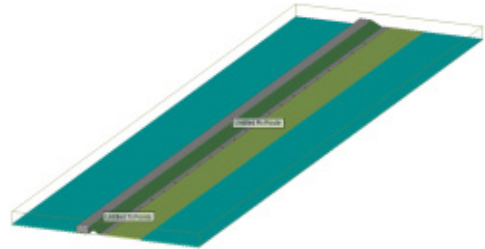


그림 5. 시뮬레이션을 위한 새만금 방조제 모델

Fig. 5 A Model of Saemangeum seawall for simulation.

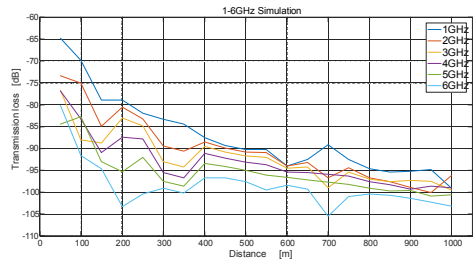
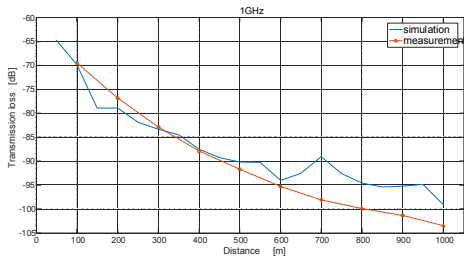
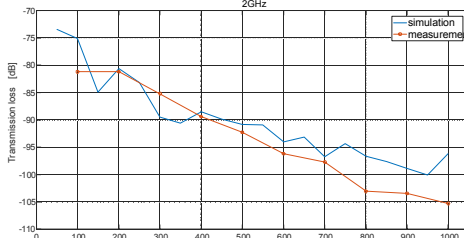


그림 6. 주파수별 거리에 따른 전송 손실 변화

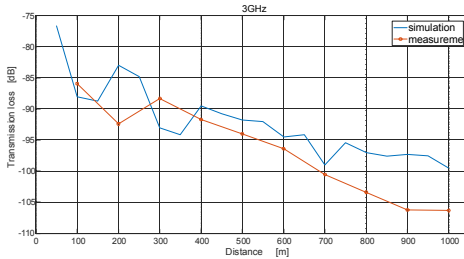
Fig. 6 Transmission loss variation with distance for each frequency.



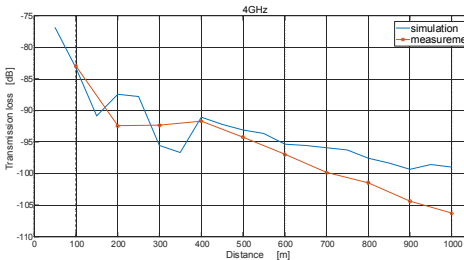
(a) 1GHz



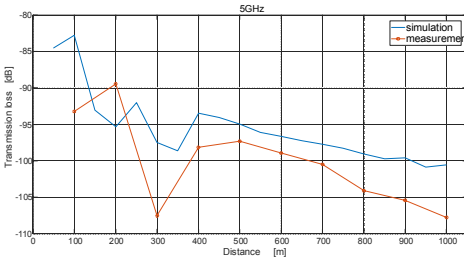
(b) 2GHz



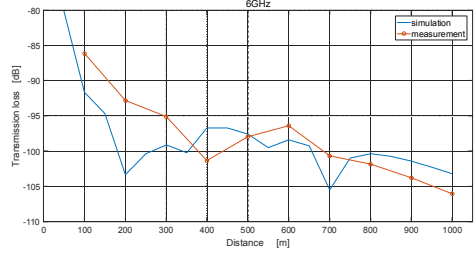
(c) 3GHz



(d) 4GHz



(e) 5GHz



(f) 6GHz

그림 7. 시뮬레이션 계산 결과와 측정 결과의 비교  
Fig. 7 Comparison of simulation calculation results and measurement results.

그러나 시뮬레이션에서 계산된 결과와 실제 측정의 결과가 모두 2-광선 모델의 전송 손실 예측 결과가 다소의 차이를 보이는 것은 경사면으로부터 영향이 있다는 것을 보여주고 있지만, 잔디의 영향에 대하여 정확한 산란, 회절 등의 파라미터 값을 산정할 수 없었다. 지형과 구조물의 특성에 대한 데이터베이스가 필요하다.

그림7에서는 측정 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 보여주고 있다. 각 주파수 별로 측정 결과(붉은 색)와 시뮬레이션 결과를 비교한 것인데 주파수 대역 별로 매우 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 경사면을 가진 반-협곡 구조에 대한 전파 전송 손실을 해석하였다. 전파 예측 모델을 설정하기 위하여 다중-광선 추적 방법을 이용하여 송수신 사이의 링크에 대한 분석을 하였고, 경사면의 기울기에 따라 전파 경로의 개수를 판단할 수 있는 차단 각도를 계산하였다. 새만금 방조제를 모델로 하여 시뮬레이션을 실행하였고, 주파수 1-6GHz 대역에 대한 수신 전력을 측정하여 비교하였다.

시뮬레이션 결과와 측정 결과는 모두 2-광선 모델의 경향을 따랐으나, 시뮬레이션과 측정 결과에 영향을 주는 경사면 지형과 구조물의 영향을 분석하는 데는 충분한 데이터 또는 측정 결과가 부족하였다. 그러나 본 연구의 결과는 전파 예측 모델 및 다양한 전파 서비스 설계에 활용될 수 있다.

다양한 지형에 대한 전파 경로 손실 측정 결과들의 축적이 필요하고, 구체적인 지형지도 및 주파수 대역별 구조물의 전기적 특성에 관하여 활용할 수 있는 데이터베이스 구축이 필요하다고 판단된다.

## References

- [1] K. Yoon, "Discrete Ray Tracing Techniques for Wave Propagation Characteristic of Random Rough Surfaces," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 3, 2010, pp. 233-238.
- [2] D. Bojanjac, R. Nay, G. Šišul, Ray "Tracing Model of Pedestrian Urban Zone," *52nd International Symposium ELMAR-2010, Zadar, Croatia*, Sept. 2010, pp. 289-292(15-17), .
- [3] K. Yoon, "Wave Propagation Characteristic from Composite Structures," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 3, 2011, pp. 343-348.
- [4] L. Denegri, L. Bixio, F. Lavagetto, A. Iscra, and C. Braccini, "An Analytical Model of Microcellular Propagation in Urban Canyons," *IEEE 65th Vehicular Technology Conference*, 2007, pp. 402-406.
- [5] H. Masui, M. Ishii, K. Sakawa, H. Shimizu, T. Kobayashi, and M. Akaike, "Microwave Path-Loss Characteristics in Urban LOS and NLOS Environments," *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference*, 2001, pp. 395-398.
- [6] K. Kim and S. Oh, "Geometric Optics-based Propagation Prediction Model in Urban Street Canyon Environments," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, pp. 1128-1131.
- [7] ITU-R P.1411-8, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz," July 2015.
- [8] K. Haneda, N. Omaki, T. Imai, L. Raschkowski, M. Peter, and A. Roivainen, "Frequency-Agile Pathloss Models for Urban Street Canyons," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, pp.

1941-1951.

- [9] K. Haneda, N. Omaki, T. Imai, L. Raschkowski, M. Peter, and A. Roivainen, "Frequency-Agile Pathloss Models for Urban Street Canyons," *IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, vol. 64, no. 5, May 2016, pp. 1941-1951.
- [10] S. Salous, *Radio Propagation Measurement and Channel Modelling*. Chichester: ,Jon Wiley & Sons Ltd., 2013.
- [11] S. Oh, Y. Lee, and H. Lee, "A Study on the Valuation of Radio Waves through a Radio Engineering Approach," *Report*, Oct. 2015.

## 저자 소개

### 이화춘(Hwa-Choon Lee)



1985년 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1987년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1995년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1995년~2016년 초당대학교 정보통신공학과 교수

2017년~현재 조선대학교 전자공학과 연구교수

※ 관심분야 : 안테나 및 전파전파, 전파 환경

### 최태일(Tae-II Choi)



1985년 인하대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1988년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1996년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1994년~현재 광주여자대학교 보건행정학과 교수

※ 관심분야 : 광전자 및 광통신, 안테나 이론, 의료 정보, Bio-signal processing