

판형 유전체의 유전율 측정 방법

Method for Measuring Dielectric Constant of Planar Dielectric Substrate

이 창 현 · 권 택 선 · 이 정 해

Chang-Hyun Lee · Taek-Sun Kwon · Jeong-Hae Lee

요 약

본 논문에서는 일반 측정환경에서 자유공간 물질상수 측정법을 사용한 판형 유전체의 유전율 측정 방법을 제안한다. 측정에는 회로망분석기와 동일한 두 개의 혼 안테나가 *S-parameter* 측정을 위해 사용되었으며, 측정 결과로부터 판형 유전체의 투과 및 반사계수를 계산하였다. 정밀한 측정을 할 수 없는 환경에서 신뢰할 수 있는 유전율을 얻기 위하여 상대적으로 측정 환경에 의한 측정불확도가 작은 투과계수의 크기만을 유전율 추정에 이용하였으며, 최종적으로 다양한 주파수에서 측정된 결과를 비교하여 유전율을 특정하였다.

Abstract

In this paper, a method for measuring the dielectric constant of a planar dielectric substrate using the free space material constant measurement method in a general measurement environment is proposed. Two horn antennas and a network analyzer were used for *S-parameter* measurement and the transmission and reflection coefficients of a planar dielectric substrate were calculated from the measurement results. To obtain a reliable dielectric constant in a low-precision-measurement environment, only the magnitude of the transmission coefficient, which has a small error due to the measurement environment, is used for dielectric constant estimation. Finally, the dielectric constant is determined by comparing the measured results at different frequencies.

Key words: Measuring Dielectric Constant, Planar Substrate, Fresnel Zone, Transmittance, Free Space Transmission

I. 서 론

전자기와 응용 실험 및 소자 개발에는 다양한 종류의 유전체가 사용되며, 이들의 특성을 알기 위해서는 정확한 유전율 측정이 요구된다. 특히, 최근에 3D 프린터를 이용한 전자소자 개발이 증가^[1]하면서 유전율 정보가 불확실한 다양한 종류의 필라멘트의 유전율 측정이 요구되고 있다. 일반적인 유전율 측정법으로는 저주파 대역에서 주로

사용되는 평행한 두 개의 금속판을 이용한 정전용량 측정법^[2]이 있고, 고주파 대역에서 주로 사용되는 도파관을 이용한 측정법^[3], 그리고 보다 정확하게 유전체 및 메타물질의 유효유전율 측정을 위해 사용되는 자유공간 전송을 이용한 측정법이 있다^{[4]~[6]}. 하지만 전자기파 응용소자 개발에 요구되는 고주파 대역에서 정확도가 높은 유전율 측정을 위해서는 자유공간 전송을 이용한 측정법이 필요하지만, 이를 수행하기 위해서는 특성이 우수한 전자

「본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2018-2016-0-00291).」

「이 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1A6A1A03031833).」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electric and Electronic Engineering, Hongik University)

· Manuscript received April 18, 2018 ; Revised June 25, 2018 ; Accepted October 17, 2018. (ID No. 20180418-050)

· Corresponding Author: Jeong-Hae Lee (e-mail: jeonglee@hongik.ac.kr)

파 흡수체, 원하는 만큼의 위상 지연을 줄 수 있는 정밀 이동장치, 정확한 각도로 시료를 고정할 수 있는 초정밀 지지대 등의 고가의 장비가 요구되어 전문적인 장비를 갖추고 있는 일부 실험실에서만 측정이 가능하다.

본 논문에서는 정밀한 유전율 측정 장비가 갖추어져 있지 않은 상황에서 표준편차율 0.5 % 이내로 유전율을 측정할 수 있는 방법을 제안한다. 표준편차율은 측정값의 표준편차를 측정값 평균으로 나눈 값의 백분율을 의미한다. 제안된 방식으로 유전율을 측정하기 위해서는 회로망 분석기와 두 개의 혼 안테나가 요구되며, 이 방식을 사용하여 제작사에서 제공하는 유전율을 알고 있는 15×15 cm² 크기에 1.16 mm 두께를 갖는 FR4 ($\epsilon_r=4.4$) 기판을 33 GHz, 35 GHz, 38 GHz에서 측정하여 약 6.8 %의 측정불확도로 기판의 유전율을 추정하였다. 추가로 유전율을 알지 못하는 3D프린터의 필라멘트로 제작된 15×15 cm² 크기에 두께 4 mm를 갖는 판형 유전체의 유전율을 FR4 측정과 같이 33 GHz, 35 GHz, 38 GHz에서 측정하여 2~2.3의 유전율을 갖는 것으로 확인하여 한 번 더 방법을 검증하였다.

II. 측정 이론 및 원리

그림 1은 판형 유전체의 유전율을 구하기 위한 측정 환경을 보여준다. 이와 같은 환경에서 S -parameter는 Friis 공식으로부터 다음과 같이 표현될 수 있다^[7].

$${}^{wi}S_{21} = T \sqrt{\frac{PG\eta_0}{4\pi r^2}} e^{-j\beta r} \sqrt{\frac{r^2}{(2r)^2}} \sqrt{\frac{G\lambda^2}{4\pi}} e^{-j\beta r} = T \sqrt{\frac{PG^2\lambda^2\eta_0}{(8\pi r)^2}} e^{-j2\beta r} \quad (1)$$

$${}^{wi}S_{11} - {}^{wo}S_{11} = \Gamma \sqrt{\frac{PG\eta_0}{4\pi r^2}} e^{-j\beta r} \sqrt{\frac{r^2}{(2r)^2}} \sqrt{\frac{G\lambda^2}{4\pi}} e^{-j\beta r} = \Gamma \sqrt{\frac{PG^2\lambda^2\eta_0}{(8\pi r)^2}} e^{-j2\beta r} \quad (2)$$

${}^{wi}S_{21}$ 와 ${}^{wi}S_{11}$ 은 측정 시료가 있을 때 S -parameter이며, ${}^{wo}S_{11}$ 은 측정 시료가 없을 때 S -parameter로 안테나 내부의 반사를 의미한다. S -parameter는 수신단에서 측정된 전자기파의 크기를 송신단에서 입력된 전자기파의 크기를 나눈 것을 의미한다. P 는 입력파워, G 는 송수신 안테나의 이득, 그리고 β 와 η_0 는 대기 중 전파상수와 고유 임피던

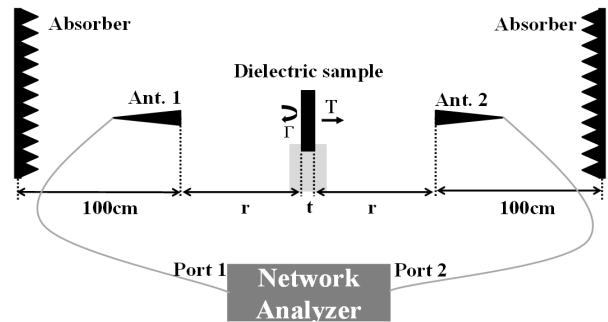


그림 1. 판형 유전체의 투과반사 측정 환경

Fig. 1. Transmission and reflection measurement environment.

스이다. T 와 Γ 는 판형 유전체의 전체 투과계수와 반사계수이다. 식 (1)과 (2)로부터 투과반사계수를 측정시료가 없을 때의 S -parameter인 ${}^{wo}S_{21}$ 에 대한 식으로 변환하면 다음과 같이 표현할 수 있다^[7].

$$T = \frac{{}^{wi}S_{21}}{{}^{wo}S_{21}} \cdot \frac{2r}{2r+t} e^{-j\beta t} \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{{}^{wi}S_{11} - {}^{wo}S_{11}}{{}^{wo}S_{21}} \cdot \frac{2r}{2r+t} e^{-j\beta t} \quad (4)$$

$$({}^{wo}S_{21}) = \sqrt{\frac{PG^2\lambda^2\eta_0}{(4\pi(2r+t))^2}} e^{-j\beta(2r+t)}$$

${}^{wo}S_{21}$ 을 사용하여 식을 표현하게 되면 안테나 정보로 제공되는 원거리장 영역의 최대 이득이 아닌 실제 측정 환경에서의 송신/수신안테나 정렬, 편파정합, Fresnel 영역의 영향이 고려된 이득을 계산에 사용하는 것이 되며, 따라서 투과계수 측정에서 두 혼 안테나의 방향 불일치 또는 원거리장 영역이 아닌 Fresnel zone 측정에 의한 측정안테나의 실효 이득 변화로 인해 발생하는 측정불확도를 보정할 수 있어 유전율 측정 정확도를 개선할 수 있다. 그림 2(a)는 수직 입사 시 판형 유전체의 투과반사 특성을 보여준다. 이와 같은 다중반사 환경에서의 판형 유전체의 전체 투과계수와 반사계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$\Gamma = \Gamma_1 + \frac{T_1 T_2 \Gamma_2 e^{-j2\beta t}}{1 - e^{-j2\beta t} \Gamma_2^2}$$

$$T = \frac{T_1 T_2 e^{-j\beta t}}{1 - e^{-j2\beta t} \Gamma_2^2} \quad (5)$$

$$(\Gamma_1 = -\Gamma_2 = \frac{1 + \sqrt{\epsilon_r}}{1 - \sqrt{\epsilon_r}}, T_i = 1 + \Gamma_i)$$

판형 유전체의 유전율은 식 (3), 식 (4)에 측정된 S -parameter를 적용하여 계산한 투과반사계수와 식 (5)로부터 이론적으로 계산된 투과반사계수를 비교함으로써 확인될 수 있다.

그림 2(b)는 빗각 입사 시 투과반사 특성을 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이 두께가 얇은 판형 유전체의 경우, 입사파가 빗각으로 입사해도 투과파의 진행 방향의 변화가 적다. 반면 반사파의 경우에는 빗각 입사 시 반사파의 방향이 크게 변경되는 것을 알 수 있다. 이로 인해 두께가 얇은 판형 유전체의 경우 빗각 입사에 따른 측정 불확도는 투과특성 측정결과에 비해 반사특성 측정결과에서 더 크게 나타난다. 따라서 정밀한 고정 및 측위 장비가 없는 경우, 반사계수를 이용하여 유전율을 예측하는 것보다 투과계수를 이용하여 유전율을 예측하는 것으로 정확도를 높일 수 있다.

또한, 투과계수로 유전율 추정 시 투과계수의 크기와 위상을 모두 고려하면 유전율의 실수부와 허수부의 값을 모두 구할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 판형 유전체 측정의 경우 측정시료의 두께가 매우 얇아 유전체의 유무에 따른 위상변화는 약 $e^{-j\beta t}$ ($t \ll r$)로 매우 작다. 따라서 측정위상의 측정불확도가 이보다 현저히 작은 정밀한 측정 환경이 아니라면 위상의 고려는 측정불확도를 높인다. 따라서 본 논문에서는 측정된 투과계수의 크기만을

이용하여 유전율의 실수부만을 추정하였다.

III. 측정결과 및 분석

판형 유전체의 자유전송공간에서의 투과계수 측정 시 측정된 투과계수는 측정 거리에 따라 다르게 나타난다. 거리에 따른 측정 결과에 차이를 보이는 이유는 원거리 측정의 경우, 유전체의 외각 부분에 입사되는 전자파로 인해 발생하는 diffraction 효과에 의한 것이며, 근거리 측정의 경우 투과계수 계산 수식에 고려되지 않은 근접장 효과에 의해 차이가 발생하기 때문이다⁷⁾. 따라서 측정 안테나의 방사 특성과 시료의 크기에 맞는 측정 거리의 확인이 필요하다. 그림 3은 $15 \times 15 \text{ cm}^2$ 크기를 갖는 FR4 ($\epsilon_r = 4.4$, $t = 1.16 \text{ mm}$) 기판으로 측정한 결과이며, 그림 3(a)는 적합한 측정 거리 확인을 위한 투과계수 측정 결과를 보여준다. 측정에는 $37 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 의 개구면을 가지며, $33 \sim 50.1 \text{ GHz}$ 에서 동작하는 standard gain horn이 사용되었으며, 사용된 안테나는 35 GHz 에서 23.87 dBi 의 이득과 11.7° 의 3 dB 빔폭을 갖는다. 이 안테나의 35 GHz 에서 Fresnel 영역은 $10.39 \sim 90.2 \text{ cm}$ 이다. 식 (5)를 통해 계산된 35 GHz 에서의 측정 시료의 이론적 투과계수는 0.778 이며, 이와 유사한 값으로 투과계수가 측정되는 거리(r)는 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 구간인 것을 확인하였다. 근접장 영역인 10 cm 측정에서도 이론적 투과계수와 유사한 측정값을 보였으나 근접장 영역 측정으로 인해 발생한 정재파의 영향으로 측정결과가 일정한 값을 보이지 않아 근접장 영역에서의 측정결과를 사용하지 않았다. 이론값과 유사한 측정결과를 보여준 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 구간은 측정에 사용된 안테나의 Fresnel zone(=radiated near field)이다. Fresnel zone은 방사되는 field가 주로 존재하지만, 평면파가 형성되지 않은 영역을 의미한다. 따라서 이 영역에서 측정 시 수신안테나에 도달하는 field의 위상차에 의한 수신 안테나의 이득 변화를 고려해야 하며, 이는 식 (1)에서 $w/o S_{21}$ 을 이용하여 보정된다. Fresnel zone은 방사파위가 주가 되는 영역이기 때문에 원거리 방사패턴을 이용하여 시료가 위치한 평면에서의 파워 분포를 예측할 수 있다. 방사패턴으로부터 측정 시료의 중심 도달 파워의 크기와 외각 도달 파워의 크기차를 확인해 본 결과, 측정거리가 30 cm 이고, 측정

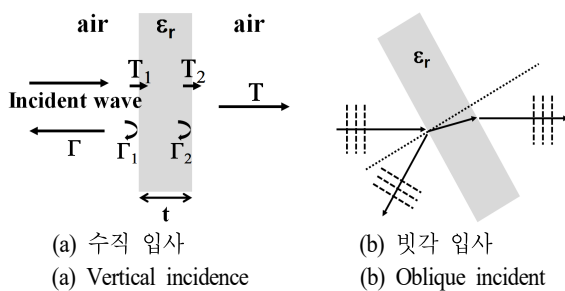
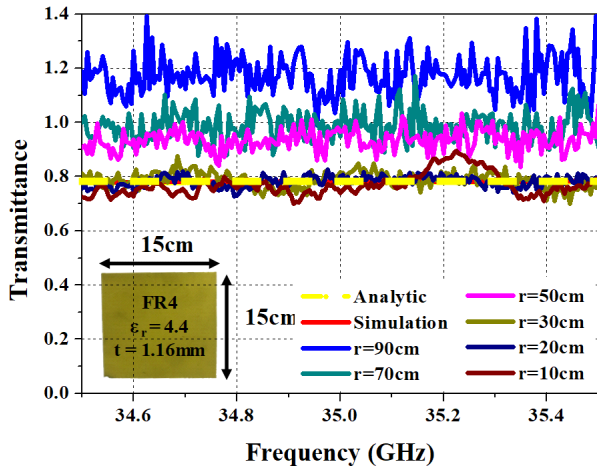


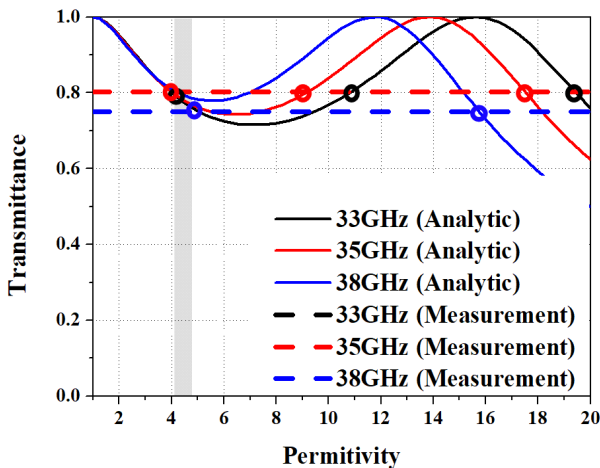
그림 2. 판형 유전체의 투과 및 반사 특성

Fig. 2. Transmission and reflection of a planar dielectric.



(a) 거리별 측정

(a) Distance



(b) 주파수별 측정

(b) Frequency

그림 3. FR4($\epsilon_r=4.4$, $t=1.16$ mm) 기판의 측정 결과

Fig. 3. Measured permittivity results of FR4 at various.

시료의 크기가 15×15 cm²일 때의 측정 시료의 중심 도달 파워의 크기와 외곽 도달 파워의 크기 차이는 약 20 dB가 나는 것으로 확인되었다. 이는 diffraction 효과를 무시할 수 있는 수준으로 낮추기 위해서는 두 파워 간 20 dB 이상의 크기 차이가 필요하다는 것을 의미한다. 그림 3(b)는 FR4 기판을 다양한 주파수 대역에서 측정한 투과계수 특성을 보여준다. 실선은 각 주파수에서 계산된 이론적인 투과계수이며, 점선은 각각의 동일한 주파수에서 측정된

투과계수 값을 나타낸다. 즉, 같은 색의 실선과 점선이 교차하는 곳의 유전율이 측정 시료의 유전율이 될 수 있다. 그림 3에서 확인할 수 있듯이 하나의 주파수 대역에서 측정한 투과계수만을 이용하여 유전율 추정 시 다수의 유전율에서 동일한 투과계수 값을 보여 하나의 유전율을 특정할 수 없다. 이는 측정 시료의 유전율의 변화가 크기 않은 범위 내의 다양한 주파수를 선택하여 측정한 결과를 비교함으로써 해결할 수 있으며, 그림 3의 경우 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$E^{freq} = \{x | T_{cal}^{freq}(x) = T_{mea}^{freq}\} \quad (6)$$

$$\epsilon_r = E^{33GHz} \cap E^{35GHz} \cap E^{38GHz} \quad (7)$$

T_{cal}^{freq} 는 식 (5)를 이용해 계산된 유전율에 따른 투과계수 값으로 그림 3(b)에 실선으로 표시되어 있으며, T_{mea}^{freq} 는 정해진 주파수에서 측정된 투과계수로 그림 3(b)에 점선으로 표시되어 있다. E^{freq} 는 측정된 주파수에서 식 (5)에 의해 이론적으로 계산된 값과 측정값이 일치하도록 하는 모든 유전율의 집합이다. 그림 3(b)에서 확인할 수 있듯이, 하나의 주파수에서 계산된 T_{cal}^{freq} 는 해당 주파수에서 측정된 T_{mea}^{freq} 와 복수의 유전율에서 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 33 GHz, 35GHz, 그리고 38 GHz의 세 주파수에서 측정하여 결과를 비교하였으며, 측정된 판형 유전체의 최종 유전율은 식 (7)에서 표현된 것처럼 각 주파수에서 이론값과 측정값이 일치하는 유전율의 집합들의 교집합으로 도출되는 하나의 해로 결정된다. 3개의 주파수에서의 측정값으로 하나의 유전율을 특정할 수 없다면 3개 이상의 주파수 대역에서 측정한 값을 비교함으로써 최종 유전율을 결정할 수 있다. 실제 적용에서는 측정불확도로 인해 교집합으로 하나의 유전율을 도출할 수 없기 때문에 그림 3(b)에서 보여지는 것과 같이 각 주파수에서 교차되는 유전율이 모두 인접하게 모여 있는 구간을 최종 유전율로 선택하였고, 각 주파수에서 확인된 유전율 범위로 측정불확도를 계산하였다. 위 방법을 이용하여 4.4의 유전율을 갖는 FR4 기판의 유전율을 제조사에서 제공하는 유전율과 약 6.8 % 내의 차이가 나도록 33~38 GHz 대역에서 확인하였으며, 최종적으로 측정된 FR4 기판의 유전율의 범위는 4.1~4.7이다.

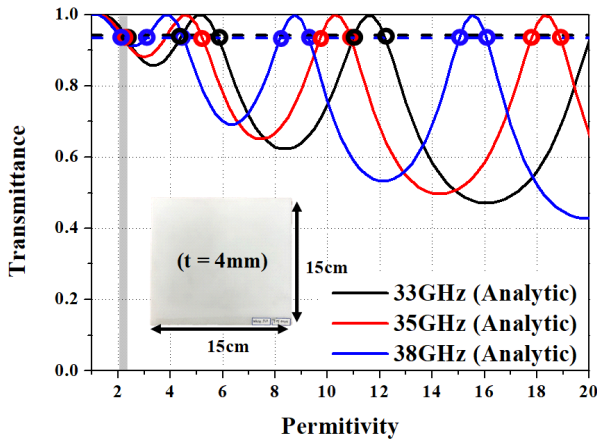


그림 4. 3D 프린터로 제작된 판형 유전체를 이용한 유전율 측정 결과

Fig. 4. Measured permittivity results of dielectric material fabricated by 3D printer.

그림 4는 3D 프린터로 제작된 판형 유전체를 이용한 유전율 측정 결과를 보여준다. 이는 측정된 방법의 검증 을 위하여 진행되었으며, 측정된 판형 유전체는 3D 프린 터용 상용 필라멘트로 제작된 것으로 두께는 4 mm이다. 앞에 나온 FR4와 동일한 방식으로 측정하였으며 측정 결과 33~38 GHz 대역에서 2~2.3의 유전율을 갖는 것으로 측정되었으며, 세 개의 주파수에서의 확인된 값들의 평균 로 추정된 측정값은 2.19, 그리고 약 0.01의 표준편차를 보였다.

IV. 결 론

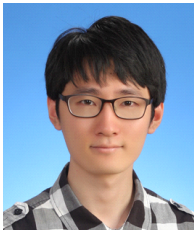
본 논문에서는 정밀한 측정 장비를 갖추지 않은 상태 에서 자유공간 전송선을 이용한 판형 유전체의 유전율 측정 방법을 제시하였다. 신뢰도를 높이기 위하여 측정환경에 의해 생기는 측정불확도가 상대적으로 낮은 투과계 수의 크기를 이용하여 유전율을 추정하였으며, 정확한 측 위장비가 없어 정확한 위상과 반사계수를 측정하기 어려운 환경에서 제안된 방법을 이용한 2회의 측정 결과로부터 약 6~7 %의 측정불확도 및 0.01의 표준편차로 유전율 을 측정할 수 있는 것을 확인하였다. 제안된 방법은 측정 시료의 손실계수를 확인할 수 없고, 다수의 주파수에서의 측정 결과를 비교하여 유전율을 구하기 때문에, 기판의

손실이 클수록 또는 주파수에 따른 유전율 변화가 클수록 측정불확도가 커진다는 단점이 있지만, 한 대의 회로 망분석기와 두 개의 안테나만을 이용하여 유전율을 측정 할 수 있어 3D 프린터를 이용한 RF 소자 개발 시에 사용 하고자 하는 필라멘트의 유전율 정보를 간단히 확인하는 데에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] M. Kong, G. Shin, S. H. Lee, and I. J. Yoon, "Investigation of 3D printed electrically small folded spherical meander wire antenna," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 17, no. 4, pp. 228-232, Apr. 2017.
- [2] A. V. Vykhodtsev, B. Kordi, and D. R. Oliver, "Sensitivity analysis of a parallel-plate method for measuring the dielectric permittivity of high-voltage insulating materials," *High Voltage*, vol. 2, no. 3, pp. 200-204, Jun. 2017.
- [3] 조치현, 강진섭, 김정환, "슬랏을 갖는 도파관형 공진기를 이용한 박막 필름의 유전율 측정," *한국전자과학 회논문지*, 24(2), pp. 214-217, 2013년 2월.
- [4] D. Li, Z. Szabo, X. Qing, E. P. Li, and Z. N. Chen, "A high gain antenna with an optimized metamaterial inspired superstrate," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 12, pp. 6018-6023, Dec. 2012.
- [5] D. R. Reid, G. S. Smith, "A full electromagnetic analysis of grooved-dielectric Fresnel zone plate antennas for microwave and millimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 8, pp. 2138-2146, Aug. 2007.
- [6] 강진섭, 김정환, 조치현, 김대찬, "자유공간 물질상수 측정법을 이용한 W-band 유전율 측정," *한국전자과학 회논문지*, 24(3), pp. 253-258, 2013년 3월.
- [7] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, John Wiley & Sons, pp. 94-96, 156-158, 722, 2016.
- [8] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, John Wiley & Sons, pp. 205-209, 2012.

이 창 현 [홍익대학교/ 박사과정]



2013년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2015년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2015년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 위상 배열안테나, 메타 물질 및 메타표면 안테나

이 정 해 [홍익대학교/교수]



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
 1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)
 1993년 3월~1996년 3월: General Atomics 교환연구원
 1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor
 1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Meta-material RF 소자, 무선전력전송

권택선 [홍익대학교/석사과정]



2017년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2017년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 석사과정
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나, 메타 물질 및 메타표면 안테나