

캐버티를 갖는 광대역 부분방전 RF 센서 연구

이승엽* · 조기량**

A Study of Partial Discharge RF Sensor for wide band with Cavity

Seung-Yeop Rhee* · Ki-Ryang Cho**

요약

본 논문에서는 다이폴 형태인 기존의 부분방전 센서의 특성을 개선하고자 센서 부분을 사다리꼴 형태로 변형시킴으로써 기존의 부분방전(PD: Partial Discharge) 센서의 단점인 협대역 특성을 개선하였다. 또한 외부 부착 센서용으로 사용함에 따라 외부로 부터의 전자파 신호를 원천적으로 차단시킬 수 있는 구조인 캐버티(Cavity) 구조를 적용함으로써 저자세와 설치의 편리성을 갖는 구조적인 장점을 살리는 부분방전 센서를 제안하고자 한다. 실험 결과 중심주파수 2.45GHz에서 약 70.5%의 광대역(1.59~3.32GHz) 특성이 있음을 보여, 광대역 특성을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, the narrow-band characteristic, which is the disadvantage of the existing the PD sensor, was improved by transforming the sensor shape into a trapezoidal shape to improve the characteristics of the dipole-shaped conventional PD(Partial Discharge) sensor. In addition, by applying a cavity structure, which is a structure that can fundamentally block the electromagnetic wave signal from the outside as it is used for an external sensor, it is a partial discharge sensor that takes advantage of the structural advantages of low cost and convenience of installation. As a result of the experiment, it was shown that there is a broadband characteristic of about 70.5%(1.59~3.32GHz) at the center frequency of 2.45GHz, and the broadband characteristic was confirmed.

키워드

PD Sensor, Wideband Sensor, Cavity
PD 센서, 광대역 센서, 캐버티

1. 서론

최근 급속한 산업규모 팽창으로 전기에너지 수요가 급증함에 따라 대용량 부하의 증가, 초고압 송전, 대용량 발전소 설치 및 운영 등 전력산업 환경이 변하고 있으며 이에 절연내력이 우수한 SF₆ 가스를 적용

한 전력기기들의 사용이 증가하고 있다. 이러한 전력 설비들은 무보수 개념의 설비이긴 하나 제작 및 현장 설치, 혹은 노후화로 인한 결함으로 부분방전이 발생하거나 절연과괴가 일어나면 매우 심각한 사고로 이어질 수 있다[1-2]. 현재 전력계통을 이루는 전력설비의 진단기술은 천재지변이나 설비 노후화 등으로 이

* 전남대학교 전자통신학과(ysrsy@jnu.ac.kr)

** 교신저자 : 전남대학교 전자통신전공

• 접수일 : 2021. 01. 14

• 수정완료일 : 2021. 03. 01

• 게재확정일 : 2021. 04. 17

• Received : Jan. 14, 2021, Revised : Mar. 01, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021

• Corresponding Author : Seung-Yeop Rhee

Dept. of Electronic Comm., Chonnam National University,

Email : ysrsy@jnu.ac.kr

상이 발생하였을 경우, 이를 신속하게 진단함으로써 경제적 손실을 최소화하기 위해 문제가 발생하기 전에 이를 미리 판단함으로써 손실을 예방하는 측면에서도 매우 중요하다. 특히, GIS(Gas Insulated Switchgear) 내부 절연과피에 대한 예방진단은 매우 중요한데 부분방전을 검출하기 위한 방법으로는 전기적 검출 방법, 초음파 검출 방법, UHF(Ultra High Frequency) 센서 이용 검출 방법 등이 있다[3-4].

이들 방법 중 전자파 검출에 의한 부분방전 측정법은 부분방전에 의한 초광대역(Ultra Wide Bandwidth, UWB) 전자파(Electro-Magnetic Wave, EM Wave) 신호를 초고주파 대역(0.3GHz~3GHz)에서 검출하는 방법으로 외부잡음에 의한 영향이 작아 현장에서의 부분방전 측정감도가 우수하여 결과적으로 결함위치 판별이 가능한 것으로 보고되어 많은 연구기관에서 꾸준히 연구되고 있다.

초고주파 센서는 GIS 점검창(Maintenance hall or Window)에 부착하는 내장형과 개방형 스페이스(Barrier) 또는 폐쇄형 스페이스에 부착하는 외장형으로 분류될 수 있으며, 각각의 특성은 설계하는 센서의 형태와 재료의 재질에 따라 다르다. 개발 초기에 사용된 초고주파 센서는 단일 디스크 형태의 검출 부를 갖는 구조를 갖고 있으며 단일 주파수 대역에서의 공진원리를 이용하여 전자파를 검출하였다. 이러한 단일 디스크 형태의 초고주파 센서는 검출 대역폭이 좁은 협대역(narrow bandwidth: $\Delta f \ll 1.5f_c$; 중심주파수) 센서로서 부분방전에 의한 방사전자파의 주파수 분석에 한계가 있으며 구조적으로 검출부인 금속 디스크가 점검창 내부의 SF₆ 가스 중에 그대로 노출되어 있어 고 전계가 인가될 경우, 검출부인 금속 디스크에서의 절연과피 위험도 제기되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 근래에는 초광대역(ultrawide-bandwidth: $\Delta f > 1.5f_c$) 또는 주파수 비의존성(Frequency independent) 패치(Patch) 형태의 센서를 초고주파 센서로 이용하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 부분방전 검출에 적용되는 UHF 센서는 초고주파 대역(0.3GHz~3GHz)을 포함하는 범위에서 1GHz 이상의 주파수 대역에 대해 전자파 신호를 검출할 수 있어야 하므로, 초광대역(Ultra Wide Band, UWB) 센서가 요구된다.

또한 GIS에 설치되는 UHF 센서는 크게 스페이스

바깥쪽에 설치되는 외장형과 GIS 해치커버에 설치되는 내장형으로 나뉜다. 외장형 UHF PD 센서는 스페이스 외부에 설치되어 GIS 내부 결합에 의해 발생하는 PD 신호를 감지하는 센서형 센서로서 노출에 의한 외부잡음 영향을 최소화하기 위해서 외관은 금속으로 차폐되어 있다.

내장형에 비해 외장형은 외부 주파수차폐를 위한 금속으로 UHF 센서인 센서부와 전자기적 결합으로 인하여 광대역 센서를 구현하는 것이 매우 어려운 실정이다. 특히, 센서로 사용된 센서의 기본 구조는 모노폴 센서로 전방향 방사 패턴을 가져 치폐된 금속에 놓이게 되면 금속과 전자기적 결합을 통해 특성이 크게 달라지는 특성이 단점을 가지고 있다. 더구나 센서의 광대역 특성에 치명적인 악영향을 준다[2-5].

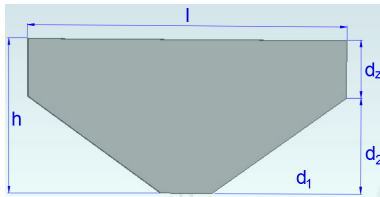
따라서 본 논문에서는 간단한 센서 구조이지만 차폐된 금속 안에서도 광대역 특성(1.5~3.0GHz)을 유지하도록 센서부를 설계할 때 차폐 구조를 포함하여 설계함으로써 실제 차폐 내부에서도 광대역 특성을 갖는 광대역 센서를 연구·개발하고자 한다.

II. 센서 구조

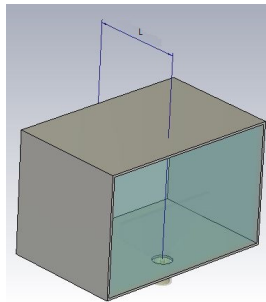
기존 외장형 센서에 많이 사용되고 있는 다이폴(Dipole) 센서는 구조는 간단하나 센서로 받아들여지는 주파수 대역폭이 매우 좁은 단점을 가지고 있다. 그리고 광대역 센서 소자인 대수주기(Log-periodic), 스파이럴(Spiral) 센서는 대역폭은 넓어지는 장점을 가지고 있으나 설계 및 구조가 매우 복잡한 단점을 가지고 있다. 또한 1GHz 이하 주파수에서 광대역을 하기 위해서는 매우 큰 구조를 갖게 됨으로써 구조적인 한계점을 가지고 있다[6-10].

그림 1은 기존 부분방전 센서로 많이 사용되는 모노폴 센서의 단점인 협대역 특성을 개선하기 위해 제안된 구조이다. 센서 구조는 단순하고 제작이 쉬운 구조이지만, 일반 모노폴 센서와는 달리 사다리꼴 형태를 갖게 함으로써 대역폭 특성을 향상시키고 제작 및 설계가 쉽다. 일반 다이폴 구조는 단일 공진 주파수를 갖는 반면에 사다리꼴 모양은 구조 특성 상 여러 공진 주파수를 포함한 광대역 안테나 구조로 많이 응용되고 있다[10]. 또한 제작비용도 절감시킬 수 있는 특

정을 가지고 있다. 그림 1에서와 같이 본 논문에서 제시한 센서는 수직 모노폴 방사소자를 갖는 단순한 구조로 이루어져 있다. 접지판과 방사체인 모노폴 주위의 차폐를 위한 금속 사이는 사용용도에 따라 공기 층을 이용하거나 유전체로 채워질 수 있다.



(a) 센서부
(a) Part of sensor



(b) 차폐용 캐버티 구조
(b) Structure of Cavity

그림 1. 제안된 PD센서부와 캐버티 구조

Fig. 1 Configuration of the proposed PD sensor with cavity

기본 구조는 길이가 l 이고 높이가 h 인 직육면체 모양의 주 방사체에 밑면을 기준으로 길이가 d_1 이고 높이가 d_2 인 삼각형을 제거한 사다리꼴 모양 구조를 가지고 있다. 이때, 삼각형 모양의 크기는 센서 특성에 매우 큰 영향을 주기 때문에 정밀하게 조정하여 부착하여야 한다.

위와 같은 센서의 공진 주파수는 수직축의 기본 방사부의 길이 h 에 따라 크게 변화하며 수평축 길이 l 은 모노폴 센서의 기본 임피던스 값에 큰 영향을 준다. 더불어, 직육면체 밑면에 있는 길이가 d_1 이고 높이가 d_2 인 삼각형 모양의 절단부는 d_1 과 d_2 길이를 조정하여 넓은 주파수 범위에서 동작하는 센서를 구현할 수 있다. 또한 센서의 임피던스를 조절할 수 있으므로, 임피던스 정합도 쉽게 이룰 수 있다. 즉, 네

가지 치수에 따라 센서의 공진주파수와 임피던스가 변하므로, 이를 적절하게 선택하면 원하는 주파수에서 임피던스 정합이 잘 이루어지도록 광대역 센서를 설계할 수 있다. 그리고 센서가 놓일 차폐된 구조에서는 센서의 위치가 매우 중요하다. 차폐 구조의 끝부분과 센서부의 급전점 사이 거리인 L 은 광대역 특성을 극대화하기 위해 조정이 필수적이다. 센서 치수와 차폐 구조 안에서의 센서의 위치, 그리고 급전점의 위치와 같은 설계 파라미터에 따른 센서 특성의 변화 양상들을 참고로 하여 제안된 구조의 센서를 원하는 용도에 맞추어 쉽게 설계할 수 있다.

III. 주요 파라미터 분석

제안된 CPW 급전 파이형 센서 파라미터 중에서 센서의 특성에 결정적인 역할을 하는 파라미터들은 그림 1에서 높이(h), 센서의 높이 길이 $h = d_2 + d_2$, 그리고 센서의 길이(l)이다. 주요 설계 파라미터에 대한 센서의 특성을 알아보기 위해 각각의 파라미터를 변화시켜보았다.

그림 2는 사다리꼴 센서의 높이의 일부분인 d_2 을 7mm로 고정하고 d_2 를 5~20mm까지 증가한 경우이다. 즉, $l=50\text{mm}$, $L=42\text{mm}$ 일 때 h 를 12~27mm까지 증가한 경우이다.

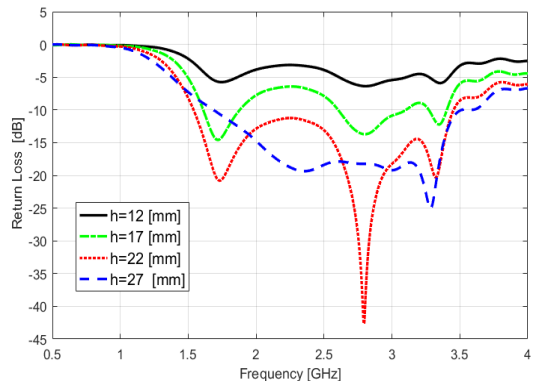


그림 2. h 변화에 따른 임피던스 변화
Fig. 2 Impedance variation with respect to h

즉, h 를 12~27mm까지 증가함에 따라 센서의 임피던스 특성 변화를 구한 결과이다. 높이가 증가함에 따라 임피던스 특성이 좋아졌지만 $h=22\text{mm}$ 을 기준으

로 더 커지면 오히려 특성이 나빠지는 경향을 보였다. 그림 3은 $d_1=15\text{mm}$, $h=22\text{mm}$ 일 때 센서의 위쪽 폭인 l 의 길이를 45mm에서 60mm까지 변화할 시킬 때 센서의 임피던스를 계산한 결과이다. l 을 크게 변화시켜 봤지만 다른 파라미터보다 적은 변화가 있는 파라미터임을 알 수 있다.

그림 4는 $h=22\text{mm}$, $l=50\text{mm}$ 일 때 센서의 아래쪽 폭인 d_1 의 길이를 11mm에서 17mm까지 변화할 시킬 때 센서의 임피던스를 계산한 결과이다. d_1 을 크게 변화시켜 봤지만 그림 4의 위쪽 파라미터와 비슷하게 센서에 큰 변화를 주지 못하는 파라미터임을 알 수 있다. 단지, 공진 주파수에 대해 적은 영향을 주고 있음을 보이고 있다.

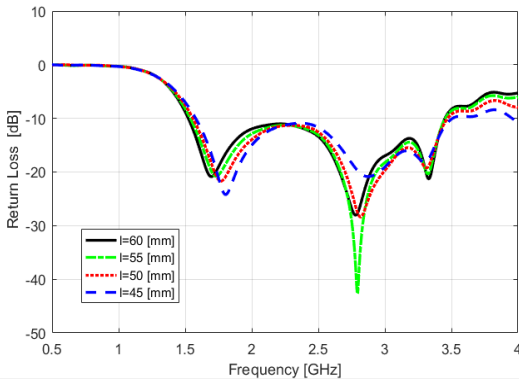


그림 3. l 변화에 따른 임피던스 변화
Fig. 3 Impedance variation with respect to l

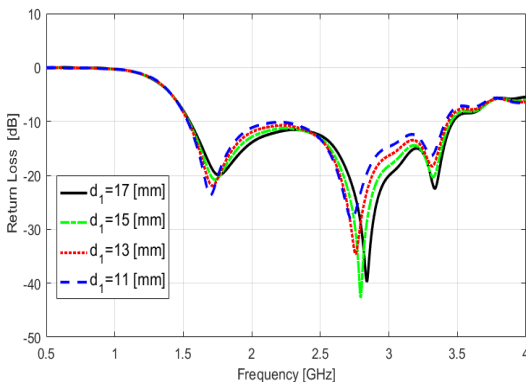


그림 4. d_1 변화에 따른 임피던스 변화
Fig. 4 impedance variation with respect to d_1

그림 5는 $d_1=15\text{mm}$, $h=22\text{mm}$, $l=50\text{mm}$ 일 때 차폐

용 캐비티로부터 급전점과의 거리를 나타내는 파라미터인 L 변화에 대한 특성변화를 보인 것이다. L 변화는 38.0~44.0mm까지 증가했을 때 입력임피던스는 크게 변화하였다. 2.5GHz 이상의 주파수 대역에서 보다 더 큰 변화를 보이고 있다.

그림에서 보듯이 2.5GHz이상의 대역에서는 L이 작을수록 좋은 특성을 보이지만 2.5GHz이하의 주파수 대역에서는 L이 클수록 좋아지는 특성을 볼 수 있어 이 파라미터는 다른 파라미터와 적절하게 trade-off할 수 밖에 없는 중요한 파라미터이다.

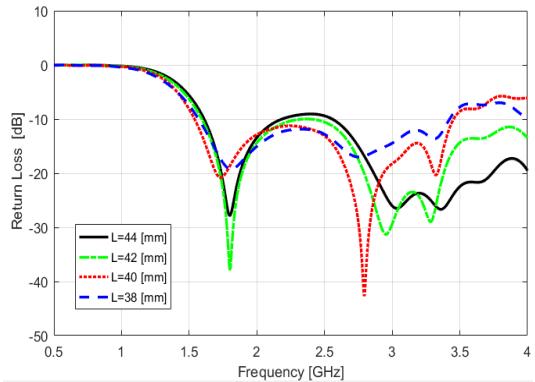


그림 5. L 변화에 따른 임피던스 변화
Fig. 5 Impedance variation with respect to L

IV. 실험 및 분석

앞장의 파라미터 분석 결과로부터 각 파라미터들의 서로 연관된 조정으로 센서의 임피던스 특성을 변화시킬 수 있음을 알 수 있었다. 결과적으로 중요한 몇 개의 파라미터들을 조정함으로써 센서의 입력임피던스 정합을 쉽게 할 수 있다. 센서에 사용된 기판은 유전율 4.3이고 기판 두께가 1.5mm인 단면 FR-4 기판을 사용하였다. 차폐용 캐비티의 크기는 $85 \times 55 \times 55\text{mm}$ 로 하였다.

각 파라미터 분석 결과로부터 얻어진 센서의 최적 설계파라미터는 사다리꼴 센서의 위쪽과 아래쪽 폭은 각각 $l=50\text{mm}$ 와 $d_1=15\text{mm}$ 로 정하였다. 센서의 특성에 큰 영향을 주는 파라미터인 센서의 높이 h 는 차폐용 캐비티로 제한이 되기 때문에 22mm로 정하였다. 그리고 또 다른 중요 파라미터인 L은 낮은 대역과 높은 대역 특성을 고려하여 42mm로 하였다.

그림 6은 외부 전자파를 차단하기 위해 알루미늄을 사용하여 제작한 차폐용 캐버티와 센서부를 부착한 전체 사진이다.

본 논문에서 제작한 센서의 임피던스 및 반사손실에 대한 측정값은 그림 8과 같다. 센서 특성 측정은 HP 8510C Network Analyzer를 이용하여 측정한 값으로 (a)는 센서의 임피던스를 스미스차트상의 궤적으로 나타낸 그림이고, (b)는 센서의 삽입손실 값을 측정한 그림이다.

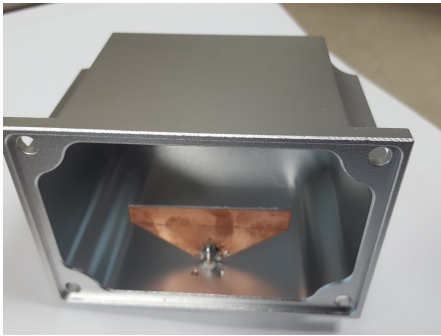
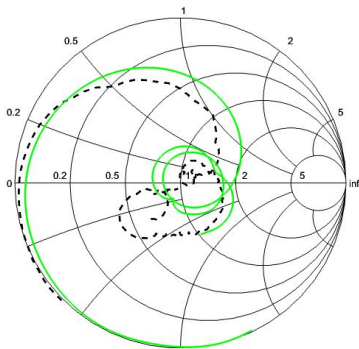
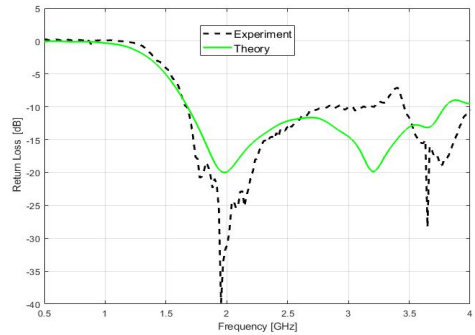


그림 6. 제작된 센서부와 차폐용 캐버티
Fig. 6 The fabricated sensor and the cavity for shield

그림 7의 (b)에서 보면 VSWR=2인 $-10dB$ 인 점을 기준으로 대역폭은 $1.59 \sim 3.32GHz$ 까지 $1.73GHz$ 이며, 중심주파수 $2.45GHz$ 기준으로 약 70.5%의 대역폭을 보이고 있다. 그림 7에서 $2.5GHz$ 이상 대역에서는 이론값과는 달리 실제 실험 결과 값과 차이가 나는 이유는 센서와 캐버티의 상호 영향으로 해석된다. 즉, 제작 후 커넥터와 센서 조립 시에 발생하는 미세한 L변화로 인한 결과로 사료된다.



(a) 센서의 임피던스
(a) Impedance characteristic of the sensor



(b) 센서의 반사손실 특성
(b) Return loss characteristic of the sensor
그림 7. 측정된 임피던스 및 반사손실
Fig. 7 Measured impedance and return loss

V. 결론 및 향후 개선 방향

본 논문에서는 기존 부분방전 센서의 협대역 문제점과 차폐 구조물로 인한 센서의 특성 변화와 같은 문제점을 해결하기 위한 것이다. 제안된 센서 구조는 사다리꼴 모양으로 센서를 차폐 구조 내부에 적절한 위치에 놓이게 함으로서 센서의 주파수 대역폭을 크게 향상시키는 구조를 제안하고, 그 특성을 연구하였다. 제안된 센서 구조를 최적화하기 위해 센서와 차폐물의 주요 파라미터 변화에 대한 임피던스 특성 변화를 살펴보고 분석하였으며, 그 파라미터들을 조정하여 광대역 특성을 갖는 센서를 설계 제작하였다. 실험 결과 차폐물에 내장하여 측정된 센서는 70.5%의 광대역 특성이 있음을 보여, 기존 센서의 단점인 협대역 특성을 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

이러한 설계 및 실험 결과는 설계자에게 센서 설계 시 중요한 설계 파라미터를 줄일 수 있는 단순한 형태의 센서를 제시함으로써 설계를 편리하게 하고, 더 나아가서는 제작 시에 제작공정의 단순화를 꾀할 수 있도록 하는 데 있다.

따라서 이러한 차폐구조를 포함한 전체적인 센서 구조는 단순한 형태를 가지고 있어, 제작 시 제작공정의 단순화로 대량생산에 용이하며, 다층구조나 기생소자를 사용하지 않기 때문에 설계 파라미터가 적어 제작 시 설계가 편리할 뿐만 아니라 설계시간을 줄일 수 있는 효과가 있다.

향후 수정된 사다리꼴 모양의 모노폴의 개수 및 모

양을 적절히 변화시킴으로써 특정 주파수 대역의 무선 신호를 센싱하는 시스템에도 쉽게 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] J. Lee, S. Oh, K. Han, J. Kang, and H. Ju, "The Study of UHF Sensor Design Optimized for Transformer Partial Discharge Measurement," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 68, no. 11, 2019, pp. 1343-1348.
- [2] W. Kim, G. Wang, T. Kang, G. Kil, and S. Kim, "Optimal Design of a TEV Sensor for Partial Discharge Detection," *J. of The Korean Society for Railway February*, vol. 22, no. 2, 2019, pp. 140-149.
- [3] C. Lee, Y. Seo, M. Jeon, J. Cho, and S. Kahng, "A V/UHF Broad Band FPCB Sensor for Partial Discharge Diagnosis," *Conference Proceedings of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Busan, Korea, July 2020-, pp. 1649-1649.
- [4] K. Park, J. Kim, Y. Song, and D. Kim, "A Design of UHF Sensor using Partial Discharge Measurement in GIS," *Conference Proceedings of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Seoul, Korea, Nov., 2002, pp. 28-30.
- [5] W. Kim, M. Kim, and Y. Baek, "Performance Verification and Improvement of UHF Sensor for the Lncreasement of the Partial Discharge Detection Reliability," *The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 63, no. 10, 2014, pp. 1461-1466.
- [6] J. Yoon and Y. Rhee, "Design and Fabrication of Dual-Ring Monopole Antenna for Wideband Characteristics," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 9, 2013, pp. 1285-1292.
- [7] K. Cho, G. Kim and D. Kim, "Design of Broadband Microstrip Antenna for 2.5GHz with Inverted Parasite Patch and the Proximity Stub," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 467-474.
- [8] O. Kim, G. Kim, and S. Rhee, "Wideband Slot-Coupled Microstrip Antenna with The Reflector," *J. of Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 6, 2019, pp. 1045-1052.
- [9] S. X. Ta, H. Choo, and I. Park, "Broadband Printed-Dipole Antenna and Its Arrays for 5G Applications," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, 2017, pp. 2183- 2186.
- [10] K.-L. Wong, *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

저자 소개



이승엽(Seung-Yeop Rhee)

1986년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1988년 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)

1993년 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
1993년~2006년 국립여수대학교 전자통신공학과 교수
2004년 ~2005년 Syracuse대학교 방문교수
2006년 ~현재: 전남대학교 전자통신공학과 정교수
※ 관심분야 : 안테나 해석 및 설계, 초고주파 회로 설계, 전자파 해석



조기량(Ki-Ryang Cho)

1981년 광운대학교 통신공학과 졸업(공학사)
1983년 건국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

2002년 일본 오카야마대학 자연과학연구과 졸업 (공학박사)
1983년~현재 전남대학교전기전자통신컴퓨터공학부 정교수
2021년 ~현재 전남대학교 부총장
※ 관심분야 : 음성신호처리, 과동 압전 문제의 수치해석, 최적제어, 통신 시스템 등