

http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.1.161

IIBC 2014-1-22

13-28GHz 대역에서 다양한 매질의 유전율 측정

Permittivity Measurements of various Materials in 13-28GHz Band

박노옥*, 정원호*, 정명원**, 정영준**, 김종호**, 김경석***

No-Uk Park*, Won-ho Jeong*, Myung-Won Jung**, Young-Jun Chong**,
Jong-Ho Kim**, Kyung-Seok Kim****

요 약 본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 다양한 매질들에 대한 유전적 특성의 측정을 통해 유전율 결과를 제시하였다. 밀리미터파는 짧은 파장과 넓은 대역폭을 가지고 있어 부품의 소형화, 경량화가 가능하고, 정보의 대량 전송이 가능하다는 장점을 가지고 있기 때문에 그 연구의 필요성이 높아지고 있다. 이 대역의 전파는 직진성이 뛰어나고 회절성이 작으며 여러 물질들에서 전파가 흡수되어 불필요한 간섭이 잘 발생하지 않는 특징을 가지고 있다. 그렇기 때문에 밀리미터파 대역의 전파가 진행되는 과정에서 반사·투과하는 다양한 매질들의 전기적인 특성에 대한 분석이 중요할 것이다. 따라서 본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 Free Space 방식을 이용하여 물질의 반사·투과 특성을 측정하였다. 이를 활용하여 Nicolson-Ross Weir 유전율 계산법을 이용해 다양한 매질들의 유전율을 도출하였다.

Abstract This paper presents the results of permittivities of various materials by measurements of the dielectric properties for the materials in millimeter-wave band. Since the advantages of millimeter wave band include the miniaturization, weight reduction of component and a lot of information transfer, its study has received increasing attention of researches. Also, because of the characteristics of the band have the superior straightness and the small diffractive, in the band, the analysis for the reflection and transmission characteristics of the materials will be very important. Moreover, a low interference is one of characteristics of the band due to the fact that the millimeter wave is absorbed in the materials. Therefore, in this paper, the reflection and transmission characteristics of materials are measured in the band by using the free space method. Based on the presented result, the permittivities of the materials are derived by the calculation of Nicolson-Ross Weir method.

Key Words : Permittivity, Millimeter wave, Reflection, Transmission, S-parameter, NRW.

1. 서 론

밀리미터파는 일반적으로 파장이 mm인 전자기파로 EHF(Extreme High Frequency)라고 부르기도 한다. 밀리미터파는 전 세계적으로 매우 중요한 주파수 자원이지

만 컨트롤 방식이 여의치 않고, 부품이 대체로 고가라는 점 때문에 주파수 활용도가 미미했다. 하지만 밀리미터 파는 전파의 특성상 파장이 짧아 안테나 및 기기의 소형화와 경량화가 가능하다는 장점이 있고, 대역폭을 넓게 사용할 수 있어 정보의 전송에 있어 대량의 전송이 가능

*준회원, 충북대학교 전자통신공학전공

**준회원, 한국전자통신연구원

***정회원, 충북대학교 정보통신공학과(교신저자)

접수일자: 2014년 1월 23일, 수정완료: 2014년 2월 6일

게재확정일자 : 2014년 2월 7일

Received: 23 January, 2014 / Revised: 6 February, 2014

Accepted: 7 February, 2014

****Corresponding Author: kseokkim@cbnu.ac.kr

Radio & Communications Engineering, Chungbuk National University, Korea

하다는 장점이 있다. 최근 통신망의 발달로 스마트폰이나 테블릿 pc와 같은 스마트기기의 사용이 폭발적으로 증가하면서 때와 장소에 구애 받지 않고 실시간 동영상 등 광대역 통신을 이용하고자 하는 사용자가 늘어나고 있기 때문에 넓은 대역폭의 무선통신이 가능하다는 점은 밀리미터파 연구의 필요성을 높이고 있다.^{[1][2][3]}

밀리미터파 대역의 주파수는 다른 대역의 주파수와는 다른 전파 특성을 보이는데 밀리미터파 대역 주파수의 전파 특성은 직진성이 뛰어나고 지향성이 좋기 때문에 물체를 돌아가는 회절성이 적다. 또한 대기 등에 의한 흡수 손실이 크기 때문에 기후나 지형, 지물에 영향을 많이 받는다.^{[1][2][3]} 그렇기 때문에 밀리미터파는 전파가 진행하는 과정에서 반사·투과하는 매질들의 유전적 성질 및 특성에 대한 분석이 중요한데 이러한 물질의 특성을 분석하기 위한 성질의 하나가 유전율이다. 따라서 본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 실제 전파가 반사, 투과 할 수 있는 건축물 등에 사용되는 다양한 매질의 물질상수를 측정하고 이를 바탕으로 다양한 매질의 유전율을 도출하였다.

II. 유전율 측정 시나리오

유전율 측정에 앞서 유전율 측정 방식과 유전율을 도출 할 계산법을 결정해야 한다. 또한, 어떤 매질에 대해서 유전율을 측정할지 매질의 종류와 크기를 결정해야 하기 때문에 그림 1과 같이 유전율 측정 시나리오를 작성하였다.

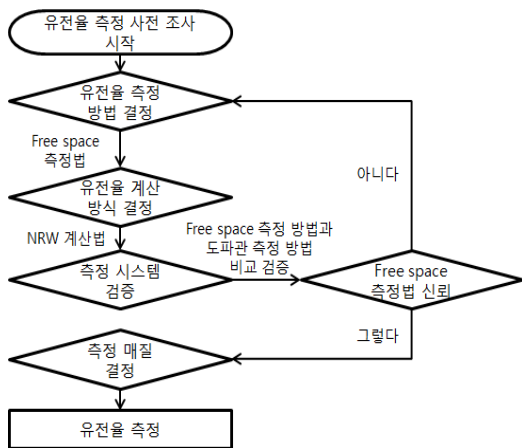


그림 1. 유전율 측정 흐름도
Fig. 1. The Flowchart of permittivity measurement

표 1. 유전율 측정 방법

Table 1. The types of permittivity measurement

측정 방법	특징
Free Space	<ul style="list-style-type: none"> • 2GHz ~ 325GHz • 유전율, 투자율 측정 가능 • 매질의 면적이 넓고 평면이어야 함 • 주파수 별 특정 크기의 매질과 지그 필요 없음
Transmission Line	<ul style="list-style-type: none"> • 500MHz ~ 110GHz • 유전율, 투자율 측정 가능 • 샘플의 정확한 가공 필요 • 동축선로, 도파관 타입의 특정 프로브 사용 • 주파수 별 특정 크기의 매질과 지그 필요
Resonant Cavity	<ul style="list-style-type: none"> • 500MHz ~ 10GHz • 유전율, 투자율 측정 가능 • 높은 정밀도를 보임 • 공진기, 도파관 타입의 특정 지그 필요 • 주파수 별 특정 크기의 매질과 지그 필요
Coaxial Probe	<ul style="list-style-type: none"> • 200MHz ~ 50GHz • 투자율은 측정 불가 • 액체 고체 분말 등 측정 가능 • 매질 두께 1cm 이상 • 표면이 깨끗하고 평면이어야 함

1. 유전율 측정 방법

물질의 유전율은 주파수에 영향을 받고, 유전율 측정 환경의 온도나 습도 등에도 영향을 받기 때문에 정확한 측정을 위해서는 측정 환경의 온도와 습도 등 주변 환경적 변수를 일정하게 유지시키는 것이 중요하다. 유전율 측정을 위한 방법은 표 1과 같이 측정하고자 하는 주파수의 범위, 측정 결과의 정밀도, 측정하고자 하는 재료의 특성 등에 따라 Resonant Cavity, Transmission Line, Coaxial Probe, Free Space 등의 방식이 있다.^{[4][5][9]}

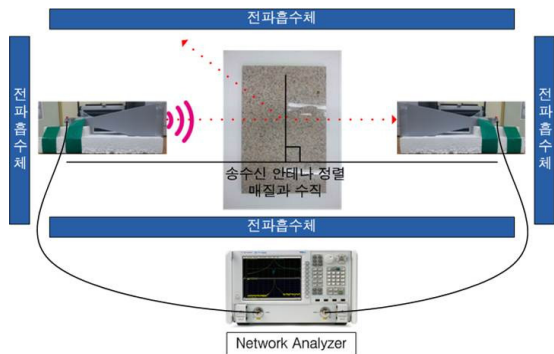


그림 2. Free space 방식의 유전율 측정 시스템
Fig. 2. The permittivity measurement system of free space method.

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 다양한 주파수에서 다양한 매질의 유전율을 측정하기 때문에 매질의 종류가 자유롭고 특정한 지그가 필요 없는 Free Space 방식으로 유전율을 측정하고자 한다. Free Space 방식으로 유전율을 측정할 때, 측정하고자 하는 매질 이외의 물질에서 반사되는 전파 간섭을 방지하기 위해 그림 2와 같이 매질과 안테나 주변으로 전파흡수체를 배치하여 유전율 측정 시스템을 구축하였다.

2. 유전율 계산 방법

유전율을 계산하는 대표적인 방법은 측정을 통해 얻을 수 있는 S-parameter를 이용해 유전율을 계산하는 NRW(Nicolson-Ross Weir)이다. 이 방법은 S11, S21 파라미터를 가지고 유전율을 구하는 방법으로 다음의 식에 의해 구할 수 있다.^{[7][8]}

$$\epsilon_r^* = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r^*} \left[\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{Z_1} \right) \right]^2 \right] \quad (1)$$

이때, 자유공간 유전율은 이미 알려진 바와 같이 $\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} F/m$ 이고, ϵ_r 은 상대 유전율, λ_0 는 파장, μ_r 는 투자율을 나타낸다. 여기서 전송계수 Z_1 과 투자율 μ_r 는 각각 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$Z_1 = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma_1}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma_1} \quad (2)$$

$$\mu_r^* = \frac{1 + \Gamma_1}{(1 - \Gamma_1)A \sqrt{\frac{1}{\lambda_0^2 - \lambda_c^2}}} \quad (3)$$

이때, S_{11}, S_{21} 은 측정을 통해 얻을 수 있는 S parameter 이고, 투자율과 전송계수를 구하기 위한 반사계수 Γ_1 과 A 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Gamma_1 = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (4)$$

$$\frac{1}{A^2} = - \left[\frac{1}{2\pi L} \ln \left(\frac{1}{Z_1} \right) \right]^2 \quad (5)$$

또한, 반사계수를 구하기 위한 산란 파라미터 X 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$X = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2} \quad (4)$$

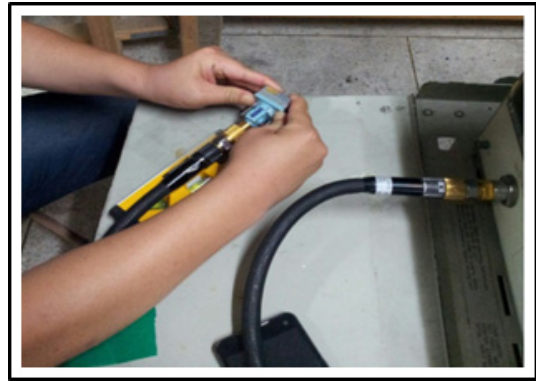
여기서 V_1, V_2 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (5)$$

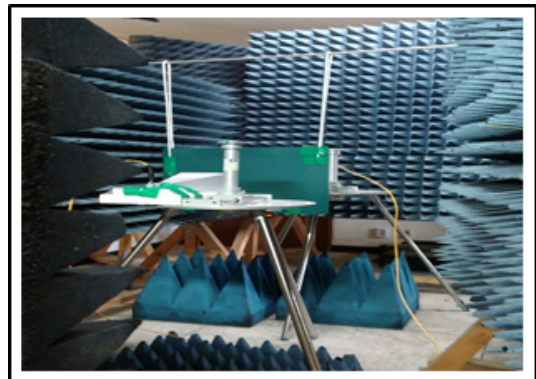
$$V_2 = S_{21} - S_{11}$$

지금까지 알아본 식 1 ~ 5를 이용하면 측정을 통해 얻은 S parameter를 이용해 유전율을 구할 수 있다.

3. 유전율 측정 시스템의 검증



(a) 도파관 방식의 유전율 측정
(a) The permittivity measurement of waveguide method



(b) Free Space 방식의 유전율 측정
(b) The permittivity measurement of free space method.

그림 3. 도파관 방식과 Free Space방식의 유전율의 측정
Fig. 3. The permittivity measurement of waveguide method and free space method.

표 2. 도파관 방식과 free space 방식의 유전율 측정 결과
Table 2. The permittivity measurement result of waveguide method and free space method.

매질의 종류	나무		고무	
	매질 有	매질 無	매질 有	매질 無
Magnitude	-2.6dB	-0.04dB	0.03dB	0.07dB
Phase	38.5°	179°	-141.45°	-2.79°
Permittivity	Wave guide	Free Space	Wave guide	Free Space
	2.16	2.01	2.23	2.19

정확한 유전율을 측정하기 위해서는 온도, 습도 등의 고려되어야 할 주변 환경이 많기 때문에 본 연구에서 구축한 측정 시스템이 신뢰할 수 있는 유전율을 측정할 수 있는지에 대한 검증이 필요할 것이다. 따라서 본 논문에서 구축한 유전율 측정 시스템의 검증을 위하여 그림 3과 같이 Free Space 방식에서 측정된 유전율과 도파관을 이용하여 Transmission line 방식에서 측정된 유전율을 비교·분석하였다.

표 2는 13.5GHz에서 유전율 측정 결과를 정리한 것으로 측정된 유전율이 나무의 경우 약 0.15, 고무의 경우 약 0.04 밖에 차이가 나지 않는 것으로 두 측정 방식에 별 차이가 없는 것을 알 수 있다. 또한, ITU-R에서 나무의 유전율을 1.99로 정의하고 있는데 이와 비교해 봐도 Free Space 방식의 유전율 측정이 신뢰할 수 있는 유전율 측정 방법이라고 판단된다.

4. 유전율 측정 매질의 결정

유전율 측정을 위한 매질은 표 3과 같이 일반적으로 건물에 사용되는 매질들로 결정하였으며, 측정 주파수를 고려하여 최소 크기를 전파가 회절 되어 수신안테나에 입사되는 것을 방지하고자 전파의 방사 크기보다 여유 공간(2λ 이상, 80mm)을 갖도록 정하였다. 매질의 두께는 특별히 제작한 것이 아니기 때문에 각각 다르게 나타나고 있지만 본 논문은 매질의 종류에 따른 유전율을 목표로 하고 있기 때문에 매질의 두께 변화는 언급하지 않는다. 안테나와 매질과의 거리는 300mm 가 되고, 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 거리는 600mm 가 되도록 측정을 진행하였다.

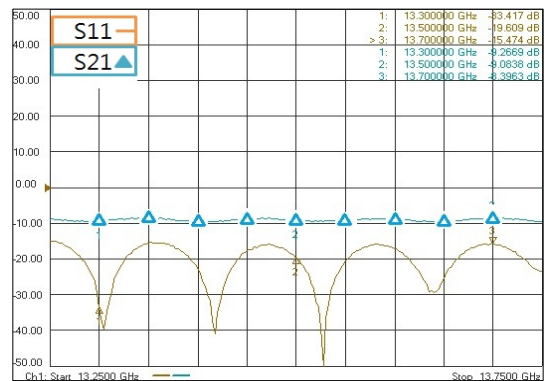
표 3. 유전율 측정을 위한 매질의 종류
Table 3. The type of materials for permittivity measurement

매질의 종류	크기(mm)/가로*세로*두께
나무	600*400*20
유리	600*610*3
대리석	625*385*44
합판	1300*600*10
타일	400*248*8
석고보드	900*840*9

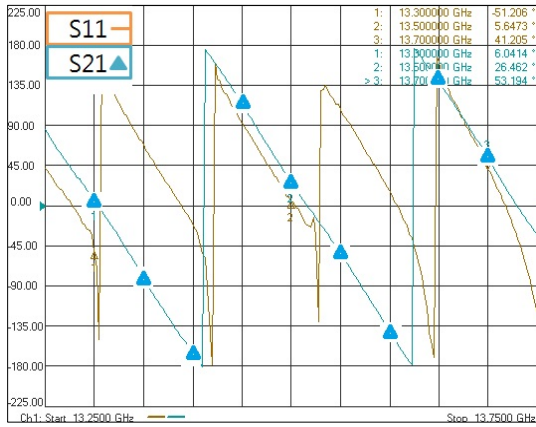
III. 유전율의 측정

전파는 송·수신 안테나 사이에 매질이 존재하게 되면 위상의 변화와 수신 파워의 감쇠를 가져오게 되는데 이를 이용해 유전율을 구하기 때문에 유전율의 측정은 먼저 자유공간에서의 전파의 위상과 수신 파워를 측정하고 난 후, 송·수신 안테나 사이에 매질을 위치시키고 각각의 매질이 보이는 전파 특성을 본 논문의 측정 주파수인 13.5, 22.85, 25.75, 28 GHz에서 각각의 매질에 대하여 측정하였다.

그림 4는 13.5GHz 에서 매질이 없을 때의 S parameter로 매질이 있을 때와 비교하여 유전율을 구하는 바탕이 된다. 그림 5와 6은 유전율이 가장 큰 매질(대리석)과 가장 작은 매질(나무)의 S parameter 측정 화면이다. 매질 없을 때의 phase와 비교해 보면 대리석은 약 87.77°, 나무는 약 43.63° 바뀐 것을 볼 수 있다. 위상은 유전율에 큰 영향 미치는 요소로 위상의 변화가 클수록 유전율이 큰 것을 결과를 통해 알 수 있다. 위상의 변화는 매질이 단단할수록 크게 나타나고 매질이 무른 나무, 석고보드 등에서 작게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

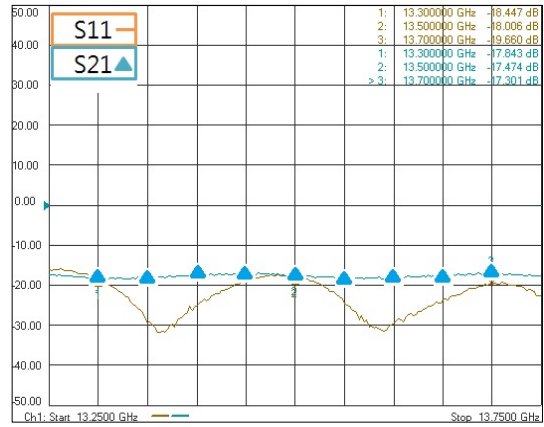


(a) 크기
(a) Magnitude

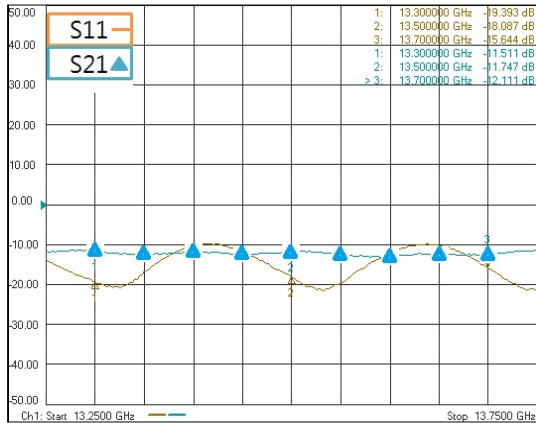


(b) 위상
(b) phase

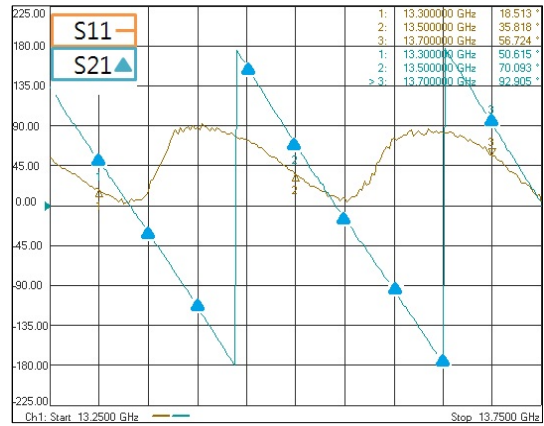
그림 4. 13.5GHz에서 매질 없을 때의 S parameter
Fig. 4. The S parameter of no material for 13.5GHz



(a) 크기
(a) Magnitude

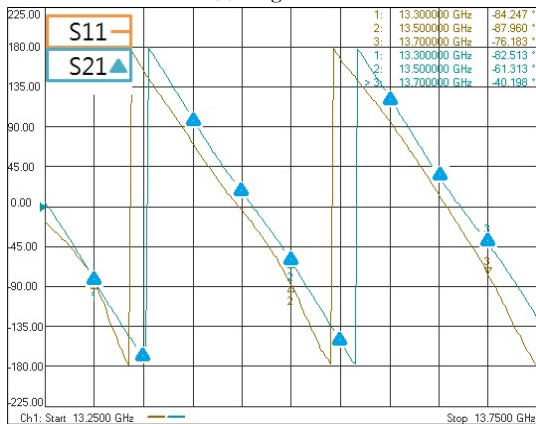


(a) 크기
(a) Magnitude



(b) 위상
(b) phase

그림 6. 13.5GHz에서 나무의 S parameter
Fig. 6. The S parameter of wood for 13.5GHz



(b) 위상
(b) phase

그림 5. 13.5GHz에서 대리석의 S parameter
Fig. 5. The S parameter of marble for 13.5GHz

표 4는 나무, 합판, 석고보드, 유리, 타일, 대리석의 유전율을 나타낸 것으로 각각의 매질에 대한 S parameter의 측정을 통해 NRW로 유전율을 계산한 결과이다. 표를 보면 대체로 딱딱한 매질에서 유전율이 높게 나오는 것을 알 수 있으며 10GHz 대역에서보다 20GHz 대역에서 유전율이 높게 나오는 것을 볼 수 있다. 주파수의 변화에 따라 유전율이 일정한 패턴으로 변하지 않는 것은 매질에 따른 주파수 반응의 특성에 기인할 수 있을 것이라 판단된다.

표 4. 밀리미터파 대역에서 다양한 매질의 유전율
Table 4. The permittivity of materials in millimeter-wave band

주파수(GHz)	13.5	22.85	25.75	28
나무	2.1129	2.1000	2.1745	2.2274
합판	3.0599	2.9794	2.9415	3.0690
석고보드	3.0189	2.9816	3.0132	3.1853
유리	3.4893	3.3962	3.4960	3.4444
타일	6.0197	6.2452	6.4025	6.2525
대리석	8.0107	8.2451	8.1266	8.1701

V. 결론

본 논문에서는 13-28GHz 대역에서 다양한 매질의 유전적 특성을 Free Space 방식으로 측정하고 NRW 유전율 계산법을 이용하여 유전율을 도출하였다. 각 매질의 유전율을 살펴보면 나무, 합판, 석고보드, 유리, 타일, 대리석 순으로 그 값이 높아지고 있는데, 그 결과 매질에 따른 유전적 특징은 매질의 단단한 정도에 따라 다르게 나타나며 대체로 매질의 단단한 정도에 비례하여 유전율이 높아지는 것을 확인할 수 있었고, 주파수 대역으로 보면 28GHz 대역에서의 유전율이 13GHz 대역보다 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 유전율은 각각의 매질에서 13GHz ~ 28GHz 의 주파수 대역에서 큰 변동이 없는 비슷한 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 각 주파수에서 측정된 데이터의 평균을 매질의 일반적인 유전율로 적용할 수 있을 것이고, 본 논문에서 측정을 통해 얻은 주파수별 매질의 유전율을 그대로 적용하여 매질에 따른 전파특성을 보다 자세히 분석할 수 있을 것이다.

References

[1] Dooyoung Youn, "Concepts and trends in millimeter-wave", KIDS Information and Communications Policy, Vol. 18, No. 14, pp.52 ~ 56, 2006.08.

[2] Jingu Lee et al. "Study of improvement at the technical standards test methods for Millimeter-wave (60GHz, 76GHz)", National Radio Research Agency report, 2007.11.

[3] Seung Eun Hong, Woo Young Lee, Hyun Kyu Jung, "A standardization trend of millimeter-wave wireless transmission technology for base on the 60GHz frequency band", TTA Journal , No. 130 87, pp.87 ~ 92, 2010.

[4] Jong-Sung Park, Young-Joon Ko, Hong-Heon kim, "Review of Measurement Technipues for Dielectric Properties of Insulating materials", The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 10, No. 9, pp.960-967, 1997.11.

[5] http://www.rfdh.com/bas_rf/network.htm, <http://www.home.agilent.com>

[6] Agilent Technologies, "Free Space Materials Measurement Seminar", 2005.06

[7] Fred I. Shimabukuro, Steven Lazar, Michael R. Chernick, Howell B. Dyson, "A Quasi-Optical Method for Measuring the Complex Permittivity of Materials", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.MTT-32, No. 7, 1984.07

[8] www.scribd.com - NRW

[9] Gyo-Yeong Cho, Wee-Sang Park, "A Permittivity Measurement of Dielectric Slabs Using a Parallel Plate Waveguide", The Journal of IWIT, VOL. 12 No. 2, 2012.04

※ 본 논문은 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음

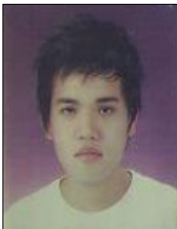
저자 소개

박 노 욱(준회원)



- 2009년 8월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파통신공학과 대학원(석사 과정)
- <주관심분야 : 위성통신, 이동통신, 무선망 Scheduling, Cognitive Radio>

정 원 호(준회원)



- 2011년 2월 : 충북대학교 정보통신공학과 졸업
- 2013년 2월 : 충북대학교 전파공학과 대학원(공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 전파통신공학과 대학원(박사 과정)

<주관심분야 : MIMO 무선채널, DDC, 디지털 라디오>

정 명 원(준회원)



- 2008년 2월 : 충남대학교 전파공학과 대학원 졸업(공학석사)
- 2008년 5월 ~ 2009년 2월 : 한국기계연구원 신뢰성평가센터 연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 전파기술연구부 선임연구원

<주관심분야 : 전파전파, 스펙트럼공학, 무선채널분석, MIMO, MU-MIMO, 채널모델>

정 영 준(준회원)



- 1992년 2월 : 제주대학교 전자공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1994년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 스펙트럼공학연구실 실장, 책임연구원

<주관심분야 : 스펙트럼공학, RF 시스템, 디지털 무전기>

김 종 호(준회원)



- 1989년 2월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 전파기술연구 책임연구원
- 1999년 3월 ~ 2006년 2월 : 충남대학교 전파공학과 대학원 졸업(공학박사)
- <주관심분야 : 전파전파, 스펙트럼공학, 무선채널분석>

김 경 석(정회원)



- 1989년 1월 ~ 1998년 12월 : 한국전자통신연구원 무선통신연구단 선임연구원
- 1999년 1월 ~ 2002년 3월 : University of Surrey(영국) 전기전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2004년 8월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 책임연구원
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 전북대학교 생체정보공학부 전임강사
- 2005년 3월 ~ 현재 : 충북대학교 정보통신공학과 부교수
- <주관심분야 : 전파감시/관리시스템, 전파신호처리, SDR, Cognitive Radio, MIMO-OFDM, 전력선통신, 디지털라디오, MIMO 무선채널분석>