

물질특성 측정장치를 이용한 D-대역 복소유전율 측정

Measurement of Complex Permittivity in D-Band Using a Material Characterization Kit

강태원* · 구현지* · 조치현* · 권재용*,**

Tae-Weon Kang* · Hyunji Koo* · Chihyun Cho* · Jae-Yong Kwon*,**

요 약

재료의 복소유전율은 전자파 통신용 소자, 부품, 시스템 설계에 주요 설계 파라미터로 사용된다. 본 논문에서는 6G 통신의 후보 주파수 대역 중 하나인 D-대역(110 GHz~170 GHz)에서 상용 물질특성 측정장치(material characterization kit)를 사용하여 평면 고체재료의 복소유전율을 측정하였다. GRL(gated-reflect-line)과 TRL(thru-reflect-line) 방법으로 벡터회로 망분석기와 도파관 주파수확장기를 포함하는 측정시스템을 교정한 후 측정대상시료의 산란계수를 측정하였다. 측정된 산란계수에 미국 표준기술연구원(NIST)에서 제안된 반복적 유전율 계산모델을 적용하여 복소유전율을 구하였으며, 두 방법으로 구한 복소유전율이 D-대역에서 서로 일치하는 것을 확인하였다.

Abstract

The complex permittivity of a material is a fundamental parameter for the design of electronic communication devices, components, and systems. In this study, we measured the complex permittivity of planar solid samples using a commercial material characterization kit (MCK) in the D-band, which is a potential 6G frequency band. The measurement system, which consists of a vector network analyzer and the MCK, is calibrated using gated-reflect-line (GRL) and thru-reflect-line (TRL) methods. The calibrated system measured the scattering parameters of the material under test (MUT). The complex permittivity of the MUT was calculated using an iterative method proposed by the National Institute of Standards and Technology (NIST). The measured results of the samples obtained using the two different calibration methods showed good agreement.

Key words: Free-Space Measurement Method, Gated-Reflect-Line, Material Characterization, Permittivity, Thru-Reflect-Line

I. 서 론

전자파 응용 분야에서 재료의 물질상수는 일반적으로 복소유전율, 복소투자율, 그리고 도전율로 주어진다. 이

들 중에서 복소유전율은 전기전자 부품 및 소자 설계, 전자기파의 전파(傳播) 채널 모델링, 전파흡수체 설계 등 다양한 분야에 이용되고 있다. 전자파의 인체영향 연구에도 복소유전율은 중요한 물질상수 중 하나이다. 데이터 통신

「이 논문은 2022년도 한국표준과학연구원의 물리 측정표준기술 고도화 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임(한국표준과학연구원-2022-GP2022-0002).」

*한국표준과학연구원 전자파표준그룹(Electromagnetic Wave Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science)

**과학기술연합대학원대학교 측정과학과(Department of Measurement Science, University of Science and Technology)

· Manuscript received November 14, 2022 ; Revised December 13, 2022 ; Accepted December 20, 2022. (ID No. 20221114-009S)

· Corresponding Author: Tae-Weon Kang (e-mail: twkang@kriss.re.kr)

고속화 및 통신 채널 광대역화 추세에 맞춰 통신시스템의 동작 주파수는 높아지고, 주파수대역은 넓어지고 있다. 이러한 전파통신 환경에서 통신시스템을 구성하는 부품·소자·기기를 설계하고 제작하기 위해서는 재료의 복소유전율이 주어져야 한다.

6G 통신의 후보 주파수대역은 110 GHz~수백 GHz이다. 본 논문에서는 후보 주파수 대역 중 하나인 D-대역(110 GHz~170 GHz)에서 물질특성 측정장치(MCK, material characterization kit)를 이용한 복소유전율의 측정 방법 및 결과를 기술한다. 측정시스템은 상용 MCK와 벡터회로망 분석기(VNA, vector network analyzer)로 구성된다. 측정시스템을 GRL(gated-reflect-line) 및 TRL(thru-reflect-line)법으로 교정하여 측정된 복소유전율을 서로 비교한다. TRL법을 사용한 복소유전율 측정은 향후 측정불확도 평가에 유용하게 활용할 수 있다. 실수부와 허수부로 표현되는 복소유전율은 등가적으로 유전상수 및 손실탄젠트로도 주어지므로 본 논문에서는 두 용어를 병용하기로 한다.

II. 자유공간 물질상수 측정법

재료의 복소유전율 측정방법에는 평행평판법, 공진기법, 전송선로법 등이 있다^[1]. 측정기기로는 임피던스 분석기, 물질상수 측정기, VNA 등이 있다. 이들 측정기기는 시편이 측정장치에 놓인 상태의 임피던스 또는 산란계수를 측정하여 물질상수 즉, 유전율 및 투자율을 계산한다. 본 논문에서는 재료의 복소유전율 측정에 대하여 다루므로 시편의 투자율은 자유공간 투자율 1로 둔다. 전송선로법은 전자파가 이동하는 전송선로의 종류에 따라 동축, 도파관, 자유공간 측정법으로 나눌 수 있다. 이 중에서 동축 및 도파관 측정법은 측정주파수가 높아질수록 측정장치의 크기가 작아져 시편의 기계적으로 가공하기 어려워진다. 자유공간 물질상수 측정법(이하 자유공간법)에서 전자파 에너지는 측정대상물질(material under test, MUT)에 한정되어 조사되어야 하므로 유전체 렌즈 안테나^[2] 또는 주름 혼(corrugated horn)^[3]이 사용된다. 근래에는 주름 혼을 적용한 상용 Swisst012 MCK가 일부 사용되고 있다.

그림 1은 자유공간 물질상수 측정시스템의 구성도와 신호흐름도이다. 그림 1(a)에서 d_{FS1} , d_{FS2} 는 각각 안테나#1

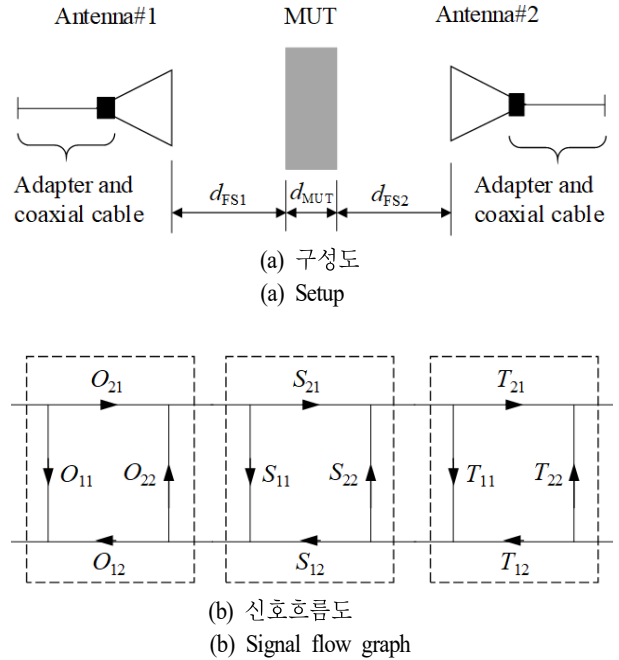


그림 1. 자유공간 물질상수 측정시스템

Fig. 1. Free-space material measurement system^[4].

에서 MUT까지, 안테나#2에서 MUT까지의 거리이고, d_{MUT} 는 MUT의 두께이다. 자유공간법에 사용되는 VNA는 동축 또는 도파관 교정키트로 교정할 수 있다. 자유공간 물질상수 측정법에서는 일반적으로 안테나를 사용하여 전자파를 송수신한다. 안테나의 주파수 범위는 도파관 주파수 대역으로 나누어지므로, 주파수 대역에 맞는 동축-도파관 어댑터와 케이블을 사용하여 VNA 포트에 연결된다. VNA의 포트1과 포트2에 연결된 동축 케이블 끝이 교정기준면일 경우 어댑터와 동축케이블, 안테나, 자유공간, 그리고 MUT를 포함하는 모델의 신호흐름도는 그림 1(b)와 같다^[4]. 여기서 S_{ij} 는 MUT에 의한 산란계수이다. O_{ij} 는 안테나1에 연결된 어댑터와 동축케이블, 안테나1, 그리고 MUT 왼쪽 표면까지의 자유공간(거리 d_{FS1})을 포함하는 산란계수이다. T_{ij} 는 MUT 오른쪽 표면에서 안테나2까지의 자유공간(거리 d_{FS2}), 안테나2, 안테나2에 연결된 어댑터와 동축케이블의 특성을 포함하는 산란계수이다.

자유공간 측정법에서 산란계수 O_{ij} 와 T_{ij} 의 효과를 보정하기 위한 교정방법에는 gated-reflect-line(GRL)^{[4],[5]}, TRL

(thru-reflect-line)^[6], TRM(thru-reflect-match)법 등이 있다. TRL법에서 길이가 정의된 전송선로(line) 기준물을 구현하려면 정의된 위상 지연을 위한 정밀 이송 장치가 필요하다. TRM법에서 정합(match) 기준물을 구현하려면 광대역 전자파 흡수체가 요구된다. GRL법에서는 반사 기준물과 시간 게이팅(time-gating)을 사용하여 측정시스템을 간편하게 교정할 수 있다.

자유공간법이 제안된 논문^{[4],[5]}에서 저자는 그림 1(a)와 같은 측정시스템을 구성하였으므로, 시편 영향 외의 실험실 공간의 주변 반사를 포함하는 영향을 GRL법을 사용하여 적절하게 제거하였다. 송수신 안테나를 일정한 위치에 고정하고, 평면 재료가 놓이는 구조물도 필요하므로 상당한 공간을 차지하게 된다. 본 논문에서는 자유공간 물질상수 측정장치인 Swissto12사의 상용 D-대역 MCK를 사용한다. MCK는 그림 1에서 d_{FS1} , d_{FS2} 가 0인 측정장치로서 주름 안테나 끝단에서 HE_{11} 모드의 선형편파된 전자파가 생성되도록 설계되었다. 즉, MCK는 물리적으로 자유공간이 필요하지 않으면서도 측정장치 내부에서 자유공간에서와 유사하게 전자파를 전파한다. 이러한 특성을 고려하여 MCK를 사용한 물질상수 측정법은 ‘도파되는 자유공간 접근’(guided free-space approach)으로 명명되기도 하였다^[7]. 근래에는 영국 물리측정연구소(NPL, National Physical Laboratory)에서 VNA기반 MCK에 TRL법을 적용하여 140 GHz~220 GHz, 500 GHz~750 GHz의 주파수 범위에서 다수의 재료에 대한 유전율을 측정하였다^[8]. VNA에 연결된 MCK를 사용하여 측정한 산란계수로부터 MUT의 유전상수 및 손실탄젠트를 구할 수 있다. 본 논문에서는 다른 참고문헌에서와 마찬가지로 미국 국립표준기술연구원(NIST)에서 제안한 소위 NIST 모델을 사용하여 복소유전율을 추출하였다^{[8],[9]}. 한편, Thomas Keating사에서 구현한 그림 1(a)의 측정시스템 ($d_{FS1} \neq 0$, $d_{FS2} \neq 0$)은 비교적 넓은 실험공간이 필요하지만, 온도변화에 따른 MUT의 물질 특성을 측정할 수 있는 장점이 있다.

III. 측정 및 결과

3-1 측정시스템

측정시스템은 그림 2와 같이 VNA, 주파수 확장기, 그

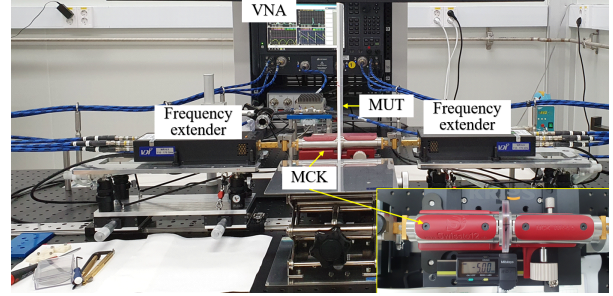


그림 2. 자유공간 물질상수 측정시스템

Fig. 2. Free-space material parameter measurement system.

리고 물질상수 측정장치로 구성된다. VNA는 Keysight Technologies사 모델 N5225B(10 MHz~50 GHz)이며, 시간 영역 분석기능을 포함하고 있다. 주파수확장기는 VDI사 모델 WR6.5(110 GHz~170 GHz)이고, 물질상수 측정장치는 Swissto12사 MCK WR-6.5이다. 그림 2의 MCK 양쪽 중절반은 주름(corrugated) 혼과 원형 도파관으로 구성되어 있다. 원형 도파관 끝에서 HE_{11} 모드 순도는 약 98 %이고, 반사손실은 20 dB 이상이다^[7]. VNA 교정 기준면은 MCK 원형 도파관의 끝부분이다. MCK의 원형 도파관 끝부분에 MUT가 놓이므로 그림 1(a)에서 $d_{FS1} = 0$, $d_{FS2} = 0$ 이 된다. 금속판을 교정기준면에 연결하여 단락(short) 기준물로 활용하고, MCK 양쪽을 직접 연결하여 만들어진 thru를 사용하여 VNA를 교정한다. VNA의 주요 설정값은 다음과 같다: IF 대역폭 500 Hz, 시간 게이팅 스패ן(span) 400 ps, 측정주파수 범위 밖의 주파수 소인 마진(sweep margin)은 3 GHz이다.

3-2 측정방법

본 논문에서 VNA 교정에 사용하는 방법은 GRL법과 TRL법이다. GRL법은 산란계수를 측정할 때 시간 게이팅을 적용한다. 시간 게이팅의 목적은 그림 1(a)에서 안테나와 MUT 사이의 공간에서 발생하는 반사파와 안테나와 어댑터의 영향을 등의 효과를 제거하기 위함이다. GRL법을 사용하여 MUT에 대해 산란계수를 얻었다면, 그 산란계수는 이미 시간 게이팅이 적용되어 구해졌다는 의미이며, 불확도 산출 시 시간 게이팅 효과를 함께 고려해 주어야 한다. TRL법에서는 먼저 VNA를 TRL법으로 교정하고

나서 산란계수를 측정하며, 이 값에 대한 시간 게이팅 혹은 필터링 과정의 적용은 산란계수 측정 과정과 분리하여 수행할 수 있다. 이와 같이 TRL법에서는 산란계수 측정과 시간 게이팅을 분리할 수 있으므로 측정불확도를 평가하는 데 유용한 방법으로 사용될 수 있다. 다음으로 는 GRL법과 TRL법을 간략하게 설명한다.

3-2-1 GRL법

GRL법으로 VNA에 MCK가 연결된 자유공간 물질상수 측정시스템을 교정하는 순서는 다음과 같다^[7].

(a) 금속 반사 기준물을 MCK 사이에 넣고, S_{11} 과 S_{22} 의 측정값을 정규화한다. 측정값의 정규화는 S_{ii} 를 선택하고 나서 VNA의 response cal을 수행하면 정규화가 이루어지는데, 이는 VNA에서 간단한 조작만으로 GRL 교정을 구현할 수 있음을 뜻한다. 정규화가 되고 나면 그림 1의 $O_{21}O_{12}$ 및 $T_{21}T_{12}$ 의 값이 결정된다. 즉, 반사 기준물의 산란계수가 -1 이 되도록 정규화된다.

(b) 금속 반사 기준물을 제거하고 MCK 양쪽을 직접 연결하여 thru를 구성한 후, S_{21} 및 S_{12} 를 측정하고 정규화한다. 측정값의 정규화는 S_{ij} 를 각각 선택한 후, VNA의 response cal을 수행하면 된다. 이 경우에는 그림 1의 $O_{21}T_{21}$ 과 $T_{12}O_{12}$ 가 결정된다.

(c) 마지막으로 주파수 영역 산란계수를 푸리에 변환(FFT)하여 시간 영역 산란계수를 얻고, 400 ps의 게이팅 스패를 적용하여 시간 게이팅한다. 시간 게이팅을 수행하면 아직 결정되지 않는 O_{11} , O_{22} , T_{11} , T_{22} 에 의한 반사를 제거하고 MUT에 의한 산란계수를 구할 수 있게 된다.

GRL법을 사용한 VNA 교정과정에서 얻은 시간영역 산

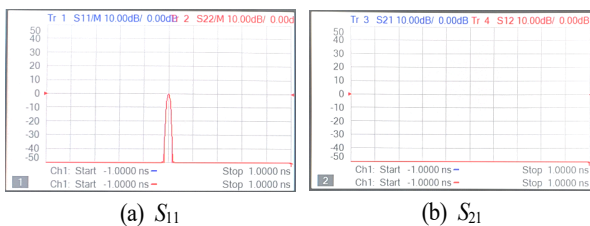


그림 3. GRL법을 이용한 교정에서 반사기준물 연결 시 정규화한 시간 영역 산란계수

Fig. 3. Normalized scattering parameters with a reflective metal plate for the GRL calibration method.

란계수 S_{21} , S_{11} 의 예를 그림 3에 보였다. S_{11} 은 반사 기준물이 놓인 시점에서 최대 반사를 일으키며, 정규화된 최대값이 1(0 dB)이 관찰된다. S_{21} 은 반사 기준물에 의해 VNA 포트2로 신호가 전달되지 않으므로 그림 3(b)와 같이 -50 dB보다 낮은 값을 알 수 있다.

(d) MUT를 MCK 사이에 넣고 시간 게이팅된 산란계수를 얻는다. 그림 4는 두께 5 mm인 아크릴 시편의 시간 영역 산란계수이다. 이 시간 영역 산란계수를 푸리에 변환하여 그림 5의 주파수 영역 산란계수 S_{21} , S_{11} 을 얻는다.

(e) 주파수 영역 산란계수를 NIST 유전율 계산식에 입력하여 유전상수와 손실탄젠트값을 얻는다. 그림 6은 아크릴 시편에 대한 결과이다. 그림 6에서 GRL 교정의 경우에 W-대역(75 GHz~110 GHz) MCK로 측정했을 때의 상한 주파수 110 GHz와 D-대역 MCK로 측정했을 때의

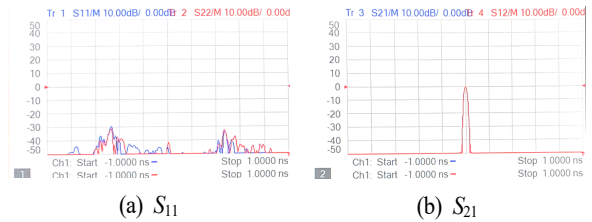


그림 4. GRL법 교정 후 아크릴 시편(두께 5 mm)의 시간영역 산란계수 측정값

Fig. 4. Time-domain scattering parameters of a 5-mm acrylic sample measured after performing GRL calibration.

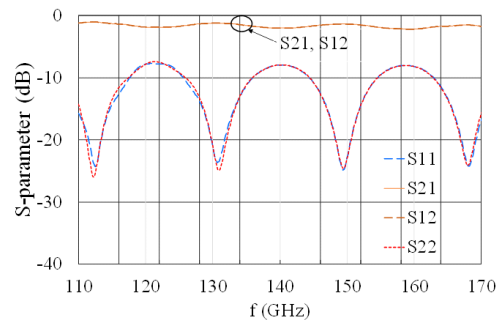
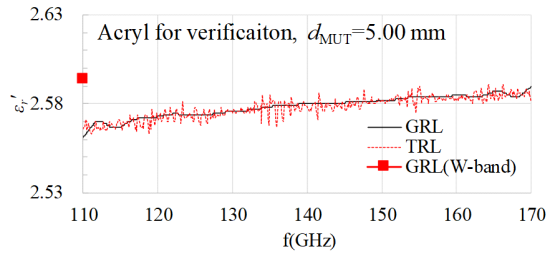
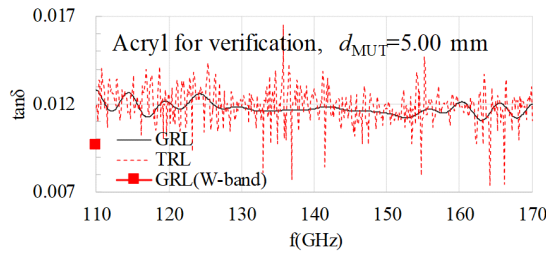


그림 5. GRL법 교정 후 아크릴 시편(두께 5 mm)의 주파수 영역 산란계수

Fig. 5. Frequency-domain scattering parameters of a 5-mm acrylic sample measured after performing GRL calibration.



(a) 유전상수
(a) Dielectric constant



(b) 손실탄젠트
(b) Loss tangent

그림 6. 비교용 아크릴 시편의 측정결과
Fig. 6. Measured results of acryl test sample.

하한 주파수인 110 GHz에서 유전상수는 1.3 %, 손실탄젠트는 23.6 %의 차이를 보였다.

그림 6은 아크릴 시편에 대한 유전상수 및 손실탄젠트 측정결과이다. 그림 6에서 GRL 교정의 경우 W-대역 상한주파수와 D-대역 하한주파수인 110 GHz에서 유전상수는 1.3 %, 손실탄젠트는 23.6 %의 차이를 보였다.

3-2-2 TRL법

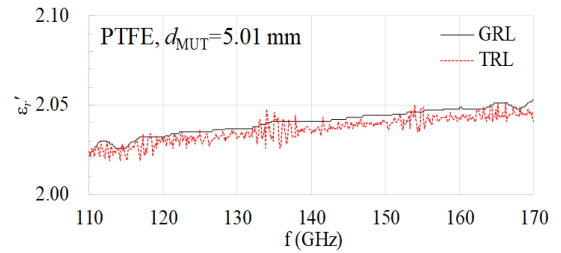
영국 측정표준기관인 NPL은 VNA와 MCK가 결합된 측정시스템을 TRL법으로 교정한 결과를 제시하였다^[8]. 연구팀은 MCK 측정장치를 사용하면 그림 1(a)에서 안테나와 MUT 간 공간이 없고 MCK 사이에 MUT만 존재하므로 시간 게이팅을 하지 않고도 TRL법으로 교정할 수 있음을 보였고, 복소유전율은 TRL 교정 후 시간 게이팅한 결과를 제시하였다.

TRL법에서 thru 및 반사 기준물은 GRL법에서와 같다. 제조사에서 제공한 line 기준물은 D-대역의 중심 주파수인 140 GHz에서 길이 $\lambda/4$, 내부 원의 직경은 MCK 끝의

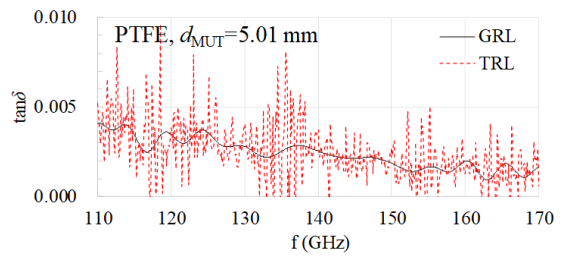
원형 도파관 직경과 같다. 그림 6에서 TRL 교정 후에 얻은 유전상수와 손실탄젠트는 110 GHz에서 GRL의 경우와 비슷한 차이를 보이지만, 주파수에 따라 크고 작은 리플이 발생함을 알 수 있다.

3-3 결과 비교

본 논문에서는 측정시스템을 TRL 교정한 경우에 시간 게이팅하지 않은 결과를 GRL 교정한 결과와 비교한다. 이 부분은 향후 불확도 평가 연구의 방향을 제시한다는 점에서 주목할만하다. 측정에 사용된 MUT는 테플론(PTFE), 유리, 고무의 3종이며, 측정결과를 그림 7, 그림 8, 그리고 그림 9에 보였다. 그림 6~그림 9의 측정결과로부터 GRL법 및 TRL법으로 측정시스템을 교정하여 얻은 복소유전율값은 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 시편 간 측정값 차이와 변화를 쉽게 관찰할 수 있도록 유전상수와



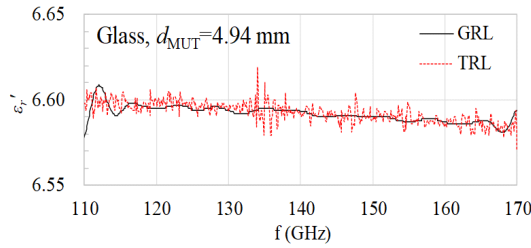
(a) 유전상수
(a) Dielectric constant



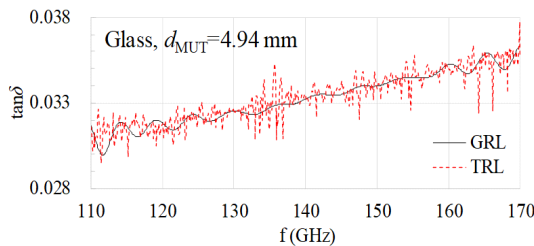
(b) 손실탄젠트
(b) Loss tangent

그림 7. 자유공간 측정법에서 GRL법 및 TRL법이 적용된 테플론(PTFE) 결과

Fig. 7. Measured results of Teflon (PTFE) sample measured by the free-space measurement method calibrated by GRL and TRL methods.



(a) 유전상수
(a) Dielectric constant

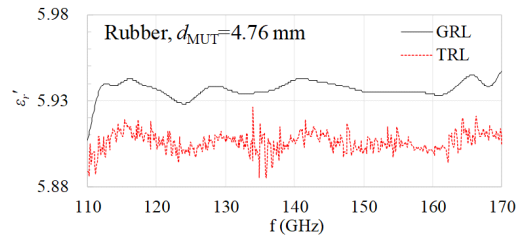


(b) 손실탄젠트
(b) Loss tangent

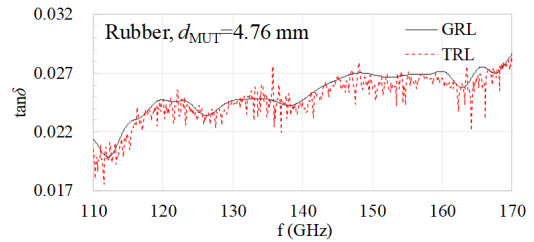
그림 8. 자유공간 측정법에서 GRL법 및 TRL법이 적용된 유리 시편의 결과

Fig. 8. Measured results of glass sample measured by the free-space measurement method calibrated by GRL and TRL methods.

손실탄젠트의 수직축의 눈금을 가능한 한 비슷하게 하여 그림을 도시하였다. 비교용 아크릴을 포함한 총 4종의 시편에 대한 측정결과를 살펴보면, TRL법에 의한 복소유전율값은 GRL법에 의한 복소유전율값을 중심으로 하여 주파수 축에서 상하로 변하는 리플 현상을 볼 수 있다. 이것은 MCK를 구성하고 있는 주름 혼과 원형 도파관 구조에서 발생하는 반사파에 의한 영향으로 보인다. 이 영향을 제거하기 위해 시간 게이팅이 포함된 GRL법을 사용하여 측정시스템을 교정하지만, 불확도를 평가할 때 VNA의 교정불확도와 시간 게이팅에 의한 불확도 성분을 분리할 수 없게 된다. 그림 9에서 고무시편에 대한 두 교정 방법 사이의 유전상수 및 손실탄젠트 측정값의 차이는 다른 시편에 비해 다소 크다. 이것은 교정 방법이 다름에서 기인하는 차이가 아니라, 다른 시편들에 비해 표면 상태가 양호하지 않고 어느 정도 휘어지는 연성을 가진 고무 시편을 MCK 사이에 장착하는 것이 반복적이지 않기 때문이라고 판단된다.



(a) 유전상수
(a) Dielectric constant



(b) 손실탄젠트
(b) Loss tangent

그림 9. 자유공간 측정법에서 GRL법 및 TRL법이 적용된 고무 시편의 결과

Fig. 9. Measured results of a rubber sample measured by the free-space measurement method calibrated by GRL and TRL methods.

IV. 결 론

VNA, 도파관 주파수 확장기, 그리고 상용 MCK를 사용하여 D-대역 자유공간 물질상수 측정시스템을 구성하였다. GRL법 및 TRL법을 사용하여 측정시스템을 교정하고 MUT를 MCK 사이에 넣고 산란계수를 측정하였다. 다수의 평면 고체 시편에 대하여 두 교정 방법을 적용하여 얻은 산란계수를 사용하여 NIST에서 제안한 반복적 유전율 계산 알고리즘으로 시편의 복소유전율을 구하였다. 두 방법으로부터 구한 복소유전율값은 서로 잘 일치하였다. 복소유전율을 측정할 때 TRL법을 적용하면 VNA 교정 불확도와 시간 게이팅에 의한 불확도를 분리해서 고려할 수 있으므로 향후 측정불확도 평가에 활용될 예정이다.

References

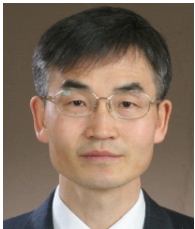
- [1] M. S. Venkatesh, G. S. V. Raghavan, "An overview of dielectric properties measuring techniques," *Canadian*

- Biosystems Engineering*, vol. 47, pp. 7.15-7.30, 2005.
- [2] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, "Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 39, no. 2, pp. 387-394, Apr. 1990.
- [3] J.-S. Kang, J.-H. Kim, C. Cho, and D.-C. Kim, "W-Band permittivity measurements using a free-space material measurement technique," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 3, pp. 253-258, Mar. 2013.
- [4] P. G. Bartley, S. B. Begley, "Improved free-space S-parameter calibration," in *2005 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Ottawa, ON, May 2005, pp. 372-375.
- [5] P. G. Bartley, S. B. Begley, "A new free-space calibration technique for materials measurement," in *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Graz, May 2012, pp. 47-51.
- [6] G. F. Engen, C. A. Hoer, "Thru-reflect-line: An improved

- technique for calibrating the dual six port automatic network analyzer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 27, no. 12, pp. 987-993, Dec. 1979.
- [7] Y. Wang, X. Shang, N. M. Ridler, T. Huang, and W. Wu, "Characterization of dielectric materials at WR-15 band (50-75 GHz) using VNA-based technique," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 7, pp. 4930-4939, Jul. 2020.
- [8] Y. Wang, X. Shang, N. M. Ridler, M. Naftaly, A. I. Dimitriadis, and T. Huang, et al., "Material measurements using VNA-based material characterization kits subject to thru-reflect-line calibration," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 5, pp. 466-473, Sep. 2020.
- [9] J. Baker-Jarvis, M. D. Janezic, J. H. Grosvenor, Jr., and R. G. Geyer, *Transmission/Reflection and Short-Circuit Line Methods for Measuring Permittivity and Permeability*, NIST Technical Note 1355-R, Washington, DC, US Government Printing Office, 1993.

강 태 원 [한국표준과학연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7457-6585>



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2003년 3월: 조지 그린 전자파연구소, 노팅엄대, 영국, 객원연구원

1990년 2월~현재: 한국표준과학연구원 물리표준본부 전자파 표준그룹 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정표준(잡음, 전력, RF전압, 임피던스, 물질상수), EMC 측정표준

구 현 지 [한국표준과학연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8337-1821>



2008년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
2015년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2015년 3월~8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 연수연구원
2015년 9월~현재: 한국표준과학연구원

전자파표준그룹 선임연구원

2018년 4월~7월: 영국 국립물리연구소(NPL) 객원연구원

[주 관심분야] 전자파 임피던스 측정표준, 반도체 측정, 물질상수 측정

조 치 현 [한국표준과학연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2506-576X>



2004년: 홍익대학교 전자공학과 (공학사)
2006년: 홍익대학교 전자공학과 (공학석사)
2009년: 홍익대학교 전자공학과 (공학박사)
2009년~2012년: 삼성탈레스 전문연구원
2012년~현재: 한국표준과학연구원 전자

파표준그룹 책임연구원

2017년: 미국 국립표준기술연구소(NIST) 객원연구원

2016년~2017년: 국가과학기술자문회의 정책연구원

[주 관심분야] RF Waveform · 디지털 통신신호 · 전자파 측정
표준, 초고주파 회로 및 안테나 설계 등

권 재 용 [한국표준과학연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0572-1005>



1995년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2002년 3월~2005년 3월: LG전자기술원

소자재료연구소 선임연구원

2005년 4월~현재: 한국표준과학연구원 물리표준본부 전자파
표준그룹 그룹장/책임연구원

2013년 3월~현재: 과학기술연합대학원대학교 측정과학과 교수

[주 관심분야] 전자파 측정표준(전자파전력, 임피던스, 안테나
측정)