

3D 프린터 재료의 유전율 추정을 위한 시간 게이트 자유 공간 측정 신호처리 기법

Time-Gated Free-Space Measurement Signal Processing Method to Estimate Dielectric Constant of 3D Printed Materials

윤대영* · 김지형** · 윤나내** · 오경현** · 우대웅*** · 박용배****

Daeyeong Yoon* · Ji Hyung Kim** · Nanae Yoon** · Kyung Hyun Oh** ·
Dae Woong Woo*** · Yong Bae Park****

요 약

본 논문은 시간 게이트(time gating)를 이용하여 시간 영역에서 다중 반사 효과를 제거하는 기법과, 이를 자유 공간 측정 시스템에 적용하여 3D 프린터로 출력한 평판 시체의 유전율을 계산한다. 벡터 회로 분석기(VNA, vector network analyzer)를 이용하여 얻은 주파수 영역에서의 공기, 도체, 그리고 피측정물(MUT, material under test)의 신호를 획득 후, 역 푸리에 변환을 이용하여 시간 영역의 신호로 변환한다. 원하는 지점에서의 반사 신호만을 추출하기 위해 시간 영역에서 윈도우 함수를 적용한다. 이어 교정을 통해 피측정물의 S_{11} 과 S_{21} 을 구하여 NRW(Nicolson-Ross-Weir) 기법을 이용해 물체의 유전율을 추정한다. 측정 결과, FDM(fused filament fabrication) 프린터에 자주 사용되는 PLA(poly-lactic acid)의 유전율의 경우 2.788, 손실은 0.054의 값을 보이며, SLA(stereo lithography apparatus) 프린터에 사용되는 일반적인 레진의 경우 유전율 3.142, 손실은 0.071의 값을 갖는다.

Abstract

In this study, we introduce a technique to eliminate the multiple reflection effects using time gating and calculate the dielectric constant of 3D printed materials using a free-space measurement system. Air, conductor, and MUT signals in the frequency domain obtained using the VNA are acquired and converted into the time domain via the inverse Fourier transform. A window function is applied in the time domain to extract only the reflected signal in the desired area. Subsequently, S_{11} and S_{21} of the MUT are obtained through calibration, and the dielectric constant of the object is estimated using the NRW method. Consequently, the dielectric constant of PLA, which is often used in FDM printers, is calculated to be 2.788 and the loss tangent is 0.054. Similarly, the dielectric constant and loss tangent for a general resin used in an SLA printer are calculated to be 3.142 and 0.071, respectively.

Key words: Time Gating, Time Domain Analysis, Free Space Method, Permittivity, Dielectric Constant

†이 논문은 2022년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.

*아주대학교 AI융합네트워크학과(Department of A.I. Convergence Network, Ajou University)

**한화시스템(Hanwha Systems)

***국방과학연구소(Agency for Defense Development)

****아주대학교 전자공학과(Department of Electronical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received May 4, 2022 ; Revised May 23, 2022 ; Accepted May 31, 2022. (ID No. 20220504-044)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

I. 서 론

최근 위성 및 무선통신 기술의 발달로 인해 밀리미터 파 대역의 수요가 증가하고 있다^[1]. 밀리미터파 대역은 파장이 매우 짧아 손실이 매우 커지는 등 마이크로파 대역과는 다른 특성을 갖는다. 따라서 해당 산업 분야에 적용되는 물질의 유전율 등 전기적 특성을 파악해야 하는 것은 매우 중요하다. 또한, 전자기 산업에서 3D 프린터의 사용이 증가하고 있으나^{[2],[3]}, 3D 프린터에 사용되는 소재의 전기적 물성 연구는 부족한 실정이다.

유전율을 측정하는 방법으로는 표 1과 같이 공진 기법, 전달지연법, S 파라미터법, 정전용량법, 자유 공간 측정기법 등, 측정 시스템 및 시제의 종류에 따라 많은 기법으로 구분될 수 있다^{[4]~[13]}. 이 중, 자유 공간 측정기법은 타 기법과 비교하면 정확도는 약간 부족하지만, 넓은 주파수 범위에 대해 측정이 가능하며, 고온 환경에서도 측정할 수 있다.

자유 공간 측정기법은 중앙에 피측정물(MUT, material under test)을 두고, 두 개의 안테나가 벡터 회로 분석기(VNA, vector network analyzer)와 연결된 형태로 구성된다. 연결된 안테나로부터 산란 계수를 측정하고, 측정된

산란 계수로부터 물질의 유전율을 추출할 수 있다. 유전율을 추출할 때는 반사 계수만을 이용하는 방법, 투과 계수를 이용하는 방법, 그리고 2개 변수 모두 이용하는 방법 등 여러 가지 기법이 존재한다. 하지만 이러한 과정에서 외부 반사 신호와 주위 환경의 잡음 등의 영향을 받기 때문에 피측정물 고유의 산란 계수를 추출하기 위해서는 추가적인 교정 기법이 필요하다.

자유 공간 측정기법의 교정을 위해서는 TRM(through reflect match), TRL(through reflect line), LRL(line reflect line), GRL(gated reflect line) 기법 등을 적용할 수 있다^{[13]~[17]}. TRM 기법은 전파흡수체가 필요하며, 비교적 우수한 성능을 보이는 TRL 및 LRL 기법은 정밀 이동장치가 필요하다. 이 중, 제일 간단한 기법인 GRL 기법은 시간 영역에서 시간 게이트 기법과 기준 반사물을 사용하여 측정 시스템을 교정한다. 하지만 GRL 기법은 Keysight (구 Aglient) 벡터 회로 분석기에서만 제공하는 기능으로, 다른 벡터 회로 분석기에서는 해당 기법을 사용할 수 없다. 또한, 시간 게이트 기법 역시 벡터 회로 분석기에서 제공하는 기능으로 사용에 제한이 있다.

본 논문에서는 벡터 회로 분석기로 얻어낸 본래 신호를 이용하여, 시간 게이트를 적용 및 교정하여 피측정물

표 1. 다양한 유전율 측정기법

Table 1. Various dielectric constant measurement technique.

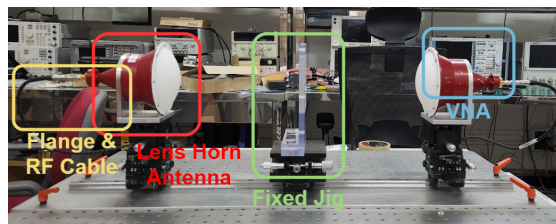
	Measurement method	Suitable samples	Characteristic	Reference
1	Open type resonator method	PCB, film, liquid sample	<ul style="list-style-type: none"> • High accuracy • Single frequency measurement • Suitable for low loss materials • Suitable for small sized sample 	[5]
2	LC resonator method	PCB, film	<ul style="list-style-type: none"> • Medium accuracy • Suitable for less than 100 MHz 	[6], [7]
3	Capacitance method	Film	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for less than 1 GHz 	[8]
4	Propagation delay method	Film, solid sample	<ul style="list-style-type: none"> • Suitable for 1 GHz or higher • Suitable for non-uniform media 	[7], [9]
5	S -parameter method - probe	Liquid, powder, absorber, film	<ul style="list-style-type: none"> • Wideband measurement • Suitable for homogeneous media 	[10]
6	S -parameter method - free space measurement method	Absorber, solid, liquid sample	<ul style="list-style-type: none"> • Low accuracy • Wideband measurement • Suitable for flat plate specimens • Measurable in high temperature 	[11]~[13]

의 산란 계수를 추출하는 신호처리 기법을 소개한다. 이어 제안한 기법을 통해 현재 국내에서는 보고되지 않은 Ka 대역에서의 대표적인 3D 프린터 재료인 polylactic acid (이하 PLA) 및 photopolymer(이하 Resin)의 유전율을 추정한다.

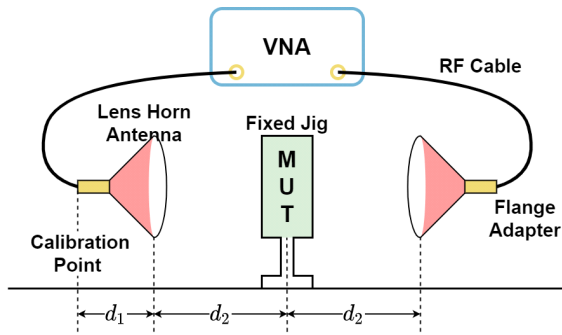
II. 자유 공간 측정기법

2-1 자유 공간 측정기법

그림 1은 자유 공간 측정 시스템 구성도를 나타낸다. 자유 공간 측정 시스템은 피측정물을 고정할 수 있는 지그와 2개의 안테나, 그리고 벡터 회로 분석기와 안테나 간의 연결을 위한 RF(radio frequency) 케이블과 플랜지(flange) 어댑터로 구성된다. 또한, 고정 지그의 중앙점과 두 안테나 간의 거리는 동일하게 위치를 조정하여야 한다. 이를 원활히 조정하기 위해 안테나와 고정 지그를 레일 위에 설치하였다. 또한, 외부 신호의 잡음의 영향을 최



(a) 측정 설정
(a) Experimental setup



(b) 간략도
(b) Sketch of measurement system

그림 1. 자유 공간 측정 시스템 구성

Fig. 1. Configuration of free space measurement method.

소화하기 위해 렌즈 혼 안테나를 설치하였다. 빔폭이 작은 안테나를 사용함으로써 피측정물의 특정 영역에서 초점을 형성하여 회절 및 외부 반사 신호의 영향을 최소화할 수 있다.

그림 2는 유전율 추출을 위한 시간 게이트 신호처리 기법을 나타낸다. 먼저 벡터 회로 분석기에서 케이블 교정을 시행하고, 이후 안테나와 연결한다. 이어 기준 반사면인 공기(air)와 완전도체(PEC, perfect electric conductor), 그리고 피측정물에 대한 산란 계수 신호를 획득한다. 이후 획득한 신호를 PC(personal computer)로 이동하여 역고속 푸리에 변환(IFFT, inverse fast Fourier transform)을 통해 측정 신호를 시간 영역으로 변환한다. 이어 완전도체의 S_{11} 과 S_{21} 신호를 비교하여 신호의 반사 영역을 구분하여 시간 게이트의 범위를 획득한다. 획득한 시간 게이트 범위에 대한 윈도우 함수를 정의한 다음, 고속 푸리에 변환(FFT, fast Fourier transform)을 이용하여 주파수 영역

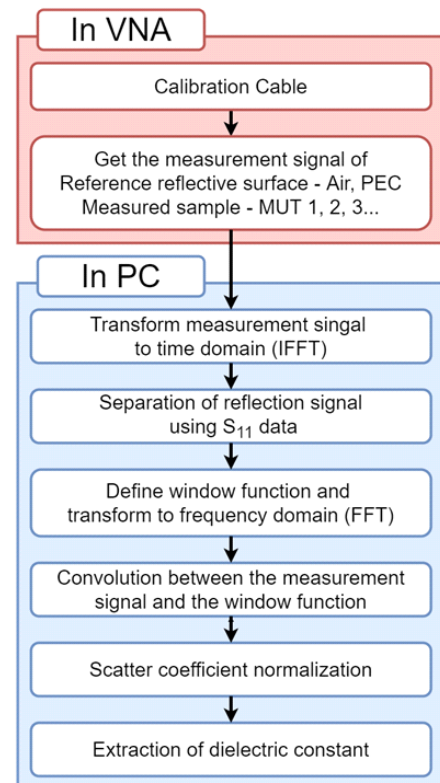


그림 2. 유전율 추출을 위한 시간 게이트 신호처리 순서도

Fig. 2. Flowchart of time gating signal processing for permittivity extraction.

으로 변환한다. 이를 벡터 회로 분석기에서 획득한 신호와 합성 곱(convolution)을 수행하여 시간 게이트를 적용한다. 그리고 산란 계수 정규화를 통해 피측정물의 고유 산란 계수를 계산한다. 마지막으로 NRW(Nicolson-Ross-Weir) 기법을 이용하여 해당 물체의 유전율을 측정한다. 해당 자세한 내용은 아래 세션을 구분하여 서술하였다.

2.2 시간 게이트 방법

벡터 회로 분석기에서 획득한 주파수 신호를 분석하기 위해 식 (1)과 같이 역 고속 푸리에 변환을 통해 얻은 신호들을 시간 영역으로 치환한다.

$$y[t] = \frac{1}{N} \sum_{f=1}^N x[f] \cdot e^{j \frac{2\pi}{N} (t-1)(f-t)} \quad (1)$$

이어, 시간 간격은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\Delta t = \frac{1}{2B} \quad (2)$$

여기서 B 는 벡터 회로 분석기에서 측정한 주파수 범위를 나타낸다. 여기에 광속 c 를 곱해줌으로써 식 (3)과 같이 거리 해상도로 표현할 수도 있다.

$$\Delta r = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

주파수 측정 범위 B 가 클수록 시간 및 거리 해상도가 작아진다. 여기에 주파수 샘플링 개수 N 을 곱해주면 유효 측정 범위 D 는 식 (4)와 같이 계산될 수 있다.

$$D = \frac{c}{2B} N \quad (4)$$

식 (4)는, 직접파와 반사파는 해당 측정 범위 내에 놓여야 할 만큼 충분한 주파수 샘플링 수를 확보해야 함을 의미한다.

시간 영역 신호를 거리에 대한 함수로 그림 3과 같이 나타내었다. 기준 반사면인 공기와 완전도체를 측정한 결과를 보여주고 있다. 다만 본 논문에서는 $200 \times 200 \times 0.4 \text{ m}^3$ 의 구리 평판을 완전도체로 가정하여 측정하였다. 거리(distance [m])가 0인 지점은 케이블 교정이 진행된 지점이며, 어댑터로 인한 약한 반사가 발생함을 확인할 수 있다.

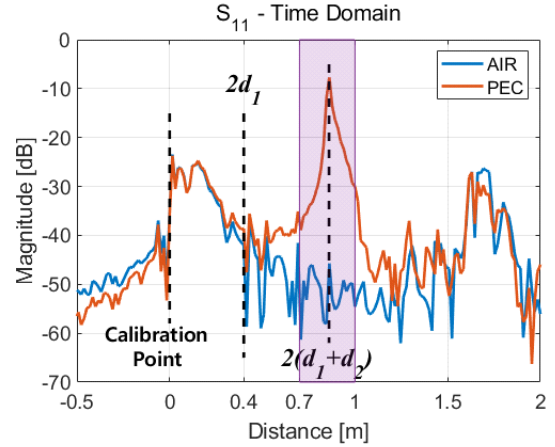


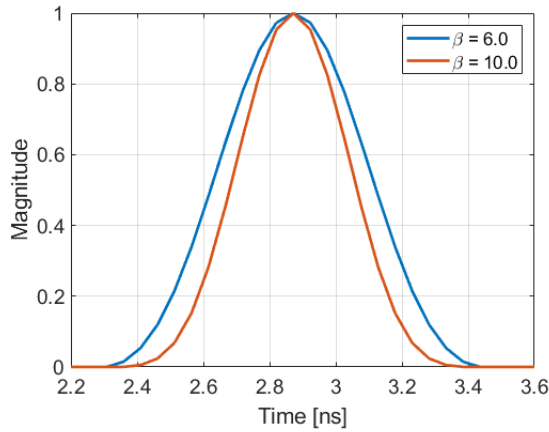
그림 3. 시간 영역에서의 반사 계수 분석
Fig. 3. Reflection coefficient at time domain.

이어 약 0.4 m 지점은 도파관과 안테나 사이 거리의 2배를 나타낸다. 이는 되돌아오는 반사 신호를 측정하기에 실제 거리보다 2배가 된다는 점을 상기해야 한다. 그리고 약 0.8 m 지점은 고정 지그에 설치된 매질의 반사 신호를 나타낸다. 이 지점에서 완전도체가 설치되었을 때, 공기와 비교하여 약 -40 dB의 큰 반사 신호 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 해당 영역에서 차이가 명확한 지점을 보라색 구역으로 표기하였다. 해당 지점에서 윈도우 함수를 적용하여 그 외의 반사 신호를 제거할 수 있다. 약 1.7 m 지점에서의 고점은 공기의 경우 반대편에 설치된 안테나로 인한 반사 신호이며, 완전도체의 경우는 완전도체와 안테나 간의 다중반사 신호이다. 본 논문에서는 약 0.7 m에서 1.0 m 지점(시간 영역에서는 약 2.4 ns에서 3.3 ns)에서 윈도우 함수를 적용하여, 원하지 않는 반사 신호를 제거하기로 한다.

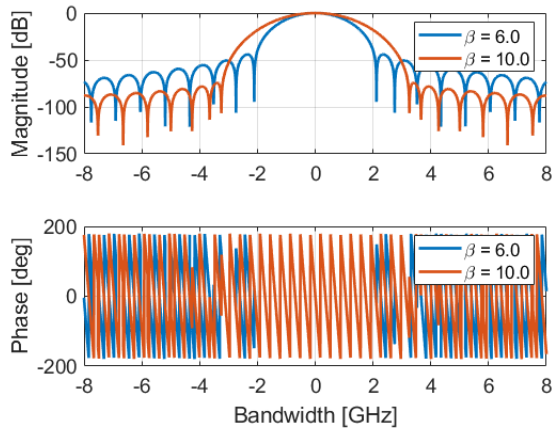
윈도우 함수는 선택한 영역 외에는 모두 0으로 정의되는 함수로, 이를 본래 신호 함수와 곱하여 사용하면 우리가 보고자 하는 영역 외의 데이터는 분리되는 효과를 얻을 수 있다. 윈도우 함수에는 해닝(hanning), 블랙맨(blackman), 플랫-탑(flat-top) 등 여러 종류를 선택할 수 있으나, 본 논문에서는 카이저(kaiser) 윈도우 함수를 선택하였다. 이는 함수의 형상을 결정할 수 있는 인자 β 를 제공하기 때문에 반사에 의한 영향을 더욱 최소화할 수 있기 때문이다. 카이저 윈도우 함수의 정의는 식 (5)와 같다.

$$w[t] = \frac{I_0\left(\beta\sqrt{1-\left(\frac{t-N/2}{N/2}\right)^2}\right)}{I_0(\beta)} \quad (5)$$

여기서 I_0 는 0차 1종 변형 베셀 함수이며, t 는 시간, 그리고 N 은 윈도우 함수의 길이이다. 그림 3에서 얻어낸 시간 범위에 대해 윈도우 함수를 정의하고, 나머지 영역에 대해서는 0으로 값을 설정한다. 이어 정의한 윈도우 함수를 고속 푸리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환한다. 그림 4에서 카이저 윈도우의 시간 및 주파수 영역을 도식하였다. β 의 값이 증가할수록 주엽의 폭이 넓어지고, 부



(a) 시간 영역
(a) Time domain

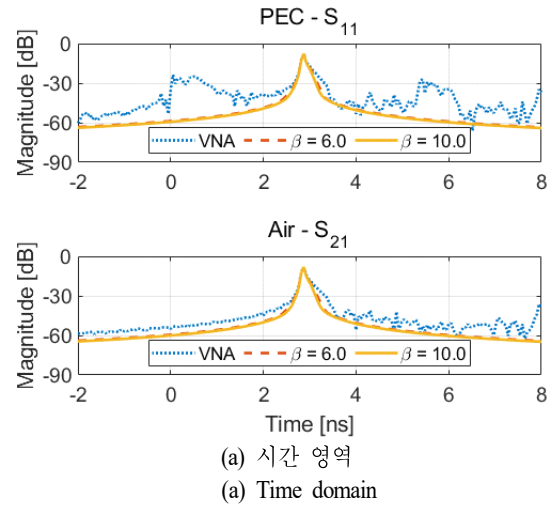


(b) 주파수 영역
(b) Frequency domain

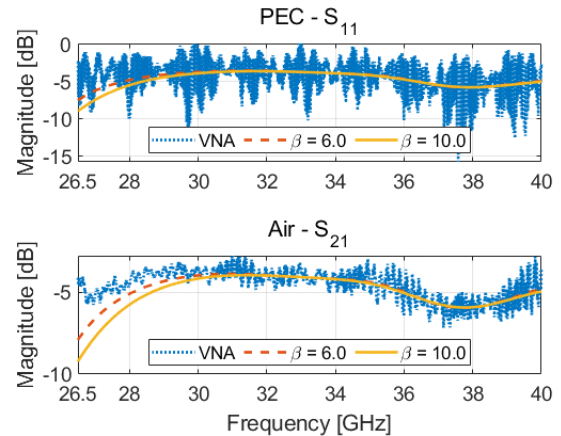
그림 4. 카이저 윈도우 함수
Fig. 4. Kaiser window function.

엽의 진폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

이어 얻어낸 주파수 영역의 윈도우 함수를 벡터 회로 분석기를 통해 얻어낸 원래의 신호와 합성 곱을 통하여 시간 게이트를 적용할 수 있다. 적용한 신호들의 결과는 그림 5와 같이 도식할 수 있다. 직접파 및 반사파의 신호 세기가 가장 큰 경우에 대해 도식하였다. 그림 5(a)의 시간 영역에서는 피측정물이 위치한 지점에서의 신호 세기가 가장 크게 검출되고, 그 외 영역에서는 신호의 크기가 매우 작아진다. 또한, β 의 크기가 커짐에 따라 영역 외부의 신호 크기가 더 작아지는 것을 확인할 수 있으나, 비교



(a) 시간 영역
(a) Time domain



(b) 주파수 영역
(b) Frequency domain

그림 5. 시간 게이트를 적용한 산란 계수
Fig. 5. S-parameter with time gating.

적 큰 차이를 보이지는 않는다. 이어 주파수 영역을 도식한 그림 5(b)에서는 반사 신호를 제거하기 전, 후의 신호를 나타내었다. 벡터 회로 분석기에서부터 얻어낸 신호를 시간 게이트 기법을 통해 반사 신호의 영향을 줄여 신호의 불규칙한 파동이 제거된 결과를 보인다. 그리고 케이블 교정지점부터 고정 지그로부터 반사된 신호, 그리고 다른 위치의 케이블 교정지점까지의 신호의 감쇠로 인하여 완전도체와 공기의 크기가 0 dB가 아님을 확인할 수 있다. 이러한 차이를 해결하기 위해 다음 절에서 산란 계수를 이용한 정규화 방법을 소개한다.

2.3 산란 계수 정규화

시간 게이트를 적용하여 얻어낸 산란 계수만으로는 피측정물 고유의 산란 계수를 계산하기는 어렵다. 또한, 측정 환경에서의 자유 공간에서 진행하는 파동의 영향을 고려하기 위해 디임베딩(de-embedding)을 수행하여야 한다. 기준 반사면 공기의 산란 계수(S_{11}^{AIR} , S_{21}^{AIR})와 완전도체의 산란 계수(S_{11}^{PEC} , S_{21}^{PEC})를 이용한 보정 방법은 식 (6)와 같다.

$$\begin{aligned} S_{11}^{MEA} &= \frac{S_{11}^{MUT} - S_{11}^{AIR}}{S_{11}^{AIR} - S_{11}^{PEC}} \cdot e^{-2jk_0 t_{PEC}} \\ S_{21}^{MEA} &= \frac{S_{21}^{MUT} - S_{21}^{PEC}}{S_{21}^{AIR} - S_{21}^{PEC}} \cdot e^{-jk_0 t_{MUT}} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 k_0 는 전파 상수, t_{PEC} 는 완전도체의 두께, t_{MUT} 는 피측정물의 두께를 의미한다. 품질 높은 물질 고유의 산란 계수를 얻기 위해서는 완전도체 평판이 얇아야 하며, 피측정물의 표면이 매끄러워야 한다. 표면의 거칠기 또는 굴곡이 심할 경우, 난반사로 인해 반사 신호의 품질이 떨어질 수 있기 때문이다.

2.4 유전율 추출

물질 고유의 산란 계수를 이용하여 유전율을 측정하는 방법은 반복법을 이용하지 않아 구현이 쉬운 NRW 기법을 이용하여 유전율을 추정하였다. NRW 기법은 산란 계수를 식 (7)과 같이 묘사함으로써 식을 전개한다.

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1}{2S_{21}} \quad (7)$$

그리고 식 (7)에서 구한 X 로부터 Γ 의 값을 얻을 수 있다.

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (8)$$

여기서 Γ 의 크기가 1 이하가 되도록 부호를 조정해야 한다. 이어 전파 인자(propagation factor) T 를 계산할 수 있다.

$$T = \frac{S_{11} + S_{21} - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (9)$$

마지막으로 유전율은 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon_r = \lambda_0^2 \left(\frac{1}{\lambda_c^2} - \left[\frac{1}{2\pi t_{MUT}} \ln \left(\frac{1}{T} \right) \right]^2 \right) \quad (10)$$

여기서 투자율의 값은 1로 가정한다. 여기서 λ_0 는 자유 공간에서의 파장을 나타내며, λ_c 는 차단주파수(cut-off frequency)에서의 파장을 의미한다. 여기서 자연로그 항의 T 를 위상각 변위 함수(unwrap)를 이용하여 연속적인 위상으로 표현해야 유전율이 발산하지 않는 결과를 보인다.

2.5 유전율 추정 불확실성

벡터 회로 분석기 및 두께 측정 오차로 인해 추정하는 유전율의 차이가 발생할 수 있다. 이에 대한 오차를 분석하기 위해 유전율 추정의 불확실성 $\Delta\epsilon_r$ 을 식 (11)과 같이 계산할 수 있다^[10]. 유전율 추정 불확실성은 해당 범위 내에 유전율의 참값이 존재할 수 있는 범위를 의미한다.

$$\Delta\epsilon_r = \sqrt{\sum \left(\frac{\partial \epsilon_r}{\partial |S_m|} \Delta |S_m| \right)^2 + \sum \left(\frac{\partial \epsilon_r}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m \right)^2 + \left(\frac{\partial \epsilon_r}{\partial d} \Delta d \right)^2} \quad (11)$$

여기서 Δ 는 불확실성을 나타내는 기호이며, S_m 은 산란 계수($m=11$ 또는 21), θ_m 은 산란 계수의 위상, 그리고 d 는 시편의 두께를 나타낸다. 그리고 $\Delta |S_m|$ 과 $\Delta \theta_m$ 은 벡터 회로 분석기에서 제공하는 데이터 시트를 참고^[18]하여 작성할 수 있다. 본 논문에서는 $\Delta |S_{11}|$ 은 0.1, $\Delta |S_{21}|$ 은 0.05, $\Delta \theta_{11}$ 은 4°, $\Delta \theta_{21}$ 은 2°의 값을 가지며, 두께 측정 오차 Δd 는 0.1 mm를 갖는 것으로 설정하였다.

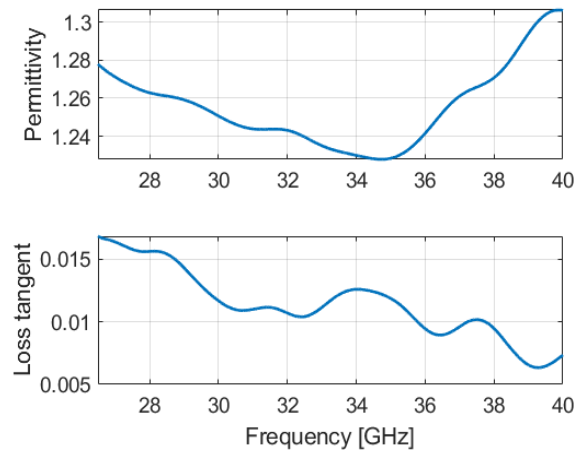
III. 유전율 측정 결과

제안한 기법을 검증하기 위해 Rohacell 71HF를 측정하여 유전율 및 손실 탄젠트를 계산하였다. Rohacell 71HF의 두께는 3.4 mm로 측정되었고, 데이터 시트에서 제공하는 유전율은 26.5 GHz에서 1.093, 손실 탄젠트는 0.0155이다. 자유 공간 측정기법을 이용하여 측정한 결과는 유전율 1.271, 손실 탄젠트 0.0122로 데이터 시트에 대비하여 각각 0.178, 0.0028의 차이를 보인다. 이러한 차이는 측정기법 및 두께 측정 오차로 인해 발생할 수 있으며, 산란 계수 기법 기반의 방법은 약 20 % 정도의 오차를 보일 수 있다^[17]. 이어 그림 6과 같이 3D 프린터 재료 PLA와 Resin의 유전율과 손실 탄젠트를 계산하였고, 그 결과를 그림 7, Ka 대역에서의 유전율 추정 불확실성을 그림 8, 마지막으로 표 2에 정리하였다.

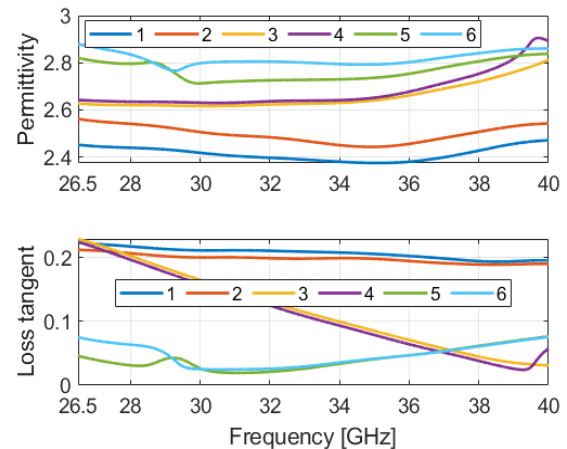
그림 8에서 모든 경우에 대한 경향을 나타내기에는 큰 의미가 없어, 대표적으로 PLA 6과 Resin 5에 대해서만 표기하였다. 그림 내 범례 “Total”은 식 (11)의 계산 결과를 나타내며, 이를 각각 시편의 두께로 인한 오차 성분 (thickness), 산란 계수의 크기에 의한 오차 성분 ($|S_{11}|$, $|S_{21}|$), 그리고 산란 계수의 위상에 의한 오차 성분 (θ_{11} , θ_{12})으로 구성하였다. Rohacell 71HF의 경우, 유전율 최대 오차



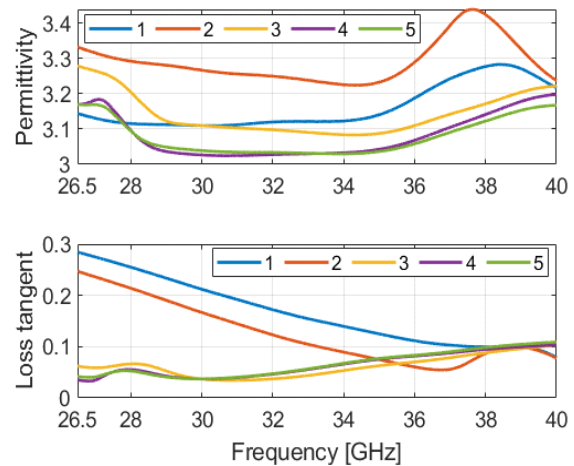
그림 6. 3D 프린터 측정 시료 및 두께 측정기
Fig. 6. 3D printed materials under test and thickness gauge.



(a) Rohacell 71HF

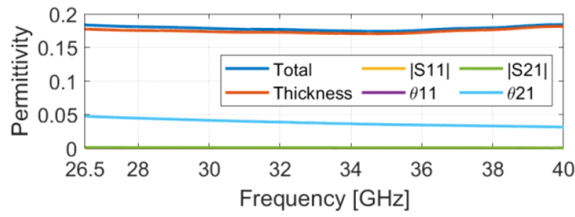


(b) PLA

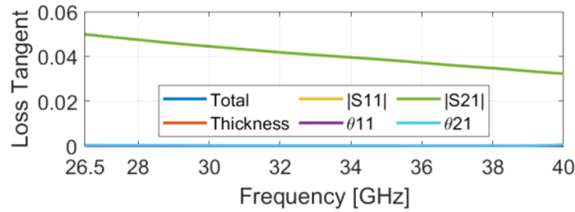


(c) Resin

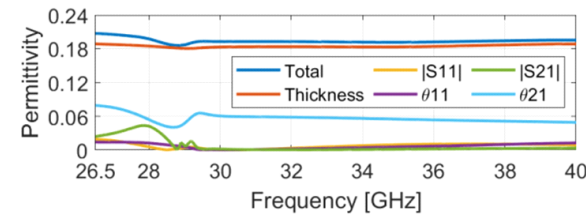
그림 7. 유전율 측정 결과
Fig. 7. Results of dielectric constant measurement.



(a) Rohacell 71HF



(b) PLA 6



(c) Resin 5

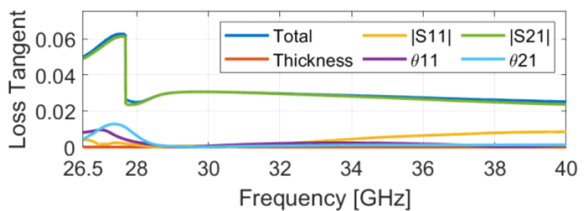
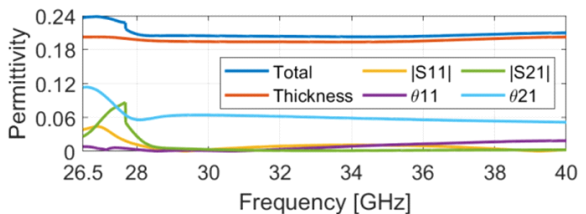


그림 8. 측정 유전율의 불확실성

Fig. 8. Uncertainty of the measured permittivity.

편차가 약 0.2057, 그리고 대역 내 평균 편차는 0.1987의 값을 보인다. 그리고 손실 탄젠트의 최대 오차 편차는 0.054, 평균은 약 0.0396의 값을 갖는다. 이어 PLA 6의 경우, 유전율 최대 및 평균 오차 편차는 0.2136, 0.1973, 그리고 손실 탄젠트의 경우는 0.0598, 0.0296의 값을 보인다. 마지막으로 Resin 5의 경우, 유전율의 불확실성의 최대 및 평균은 0.2489, 0.2202, 손실 탄젠트의 경우 각각 0.0626, 0.0307의 값을 갖는다. 모든 시편에 대해 위와 같이 계산하였고, 그 결과는 표 2에 정리하였다. 또한, 모든 시편의 유전율 추정은 두께로 인한 오차가 가장 큰 것으로 파악할 수 있다. 그리고 손실 탄젠트의 경우, $|S_{21}|$ 의 영향을 가장 크게 받는 것으로 파악하였다. 또한, 해당 부근에서의 $|S_{21}|$ 의 공진으로 인해 손실 탄젠트의 값이 일부 과대 및 과소 평가되는 경향을 확인할 수 있다.

표 2에서는 측정한 모든 시료의 두께, 유전율 및 손실 탄젠트의 추정값, 그리고 측정치의 불확실성을 나타내었다. 측정 시료는 제작이 가능한 두께 범위 내에서 제작되었다. 분석 결과, PLA의 경우 두께가 두꺼울수록 유전율이 크게 관측되는 경향을 보인다. 이어 PLA와 Resin 모두 두께에 반비례하여 손실 탄젠트가 작아지는 경향을 보인다. 이를 유전율 불확실성과 같이 관측을 하면, 두께가 두꺼울수록 표준편차가 작아지는데, 이는 시체의 두께가 두꺼워야 유전율을 정확하게 측정할 수 있음을 보여준다. 비교적 안정적인 값을 갖는 경우인 두께가 3 mm인 경우에 대해 평균을 계산하였고, PLA와 Resin의 유전율은 2.788, 3.142, 그리고 손실 탄젠트는 0.054, 0.071의 값을 보인다.

IV. 결 론

본 논문은 유전율 추정을 위해 시간 게이트 기법을 적용한 자유 공간 측정 시스템의 신호처리 기법에 관해 서술하였다. 제안한 방법은 구현이 간단하며, 벡터 회로 분석기 기종에 종속되는 기법이 아니기에 범용성이 좋으며, 소프트웨어 구매 비용이 들지 않아 학계 또는 관련 분야에서 활용할 수 있다. 또한, RF 분야에서도 폭넓게 사용되는 3D 프린터 소재의 2가지 재료에 대한 유전율을 추정하였다. FDM에 많이 사용되는 PLA의 유전율의 경우

표 2. 유전율 측정 시료와 결과 분석

Table 2. Result analysis of dielectric constant measurement samples

Measurement sample	Thickness [mm]	Estimate mean value		$\Delta\epsilon_r$ (max, mean)	
		Dielectric constant	Loss tangent	Dielectric constant	Loss tangent
Rohacell 71HF	3.40	1.271 (Datasheet: 1.093)	0.0122 (Datasheet: 0.0155)	0.2057, 0.1987	0.0540, 0.0396
PLA 1	1.21	2.278	0.197	0.5962, 0.5609	0.1174, 0.0872
PLA 2	1.09	2.517	0.197	0.5413, 0.05019	0.1251, 0.0930
PLA 3	2.17	2.678	0.114	0.3170, 0.2725	0.1544, 0.0570
PLA 4	2.21	2.691	0.106	0.3619, 0.2731	0.1501, 0.0527
PLA 5	3.16	2.743	0.051	0.2311, 0.1891	0.0693, 0.0323
PLA 6	3.09	2.833	0.058	0.2136, 0.1973	0.0598, 0.0296
Resin 1	2.08	3.199	0.151	0.3424, 0.3258	0.1016, 0.0487
Resin 2	2.12	3.297	0.121	0.3269, 0.3328	0.1068, 0.0536
Resin 3	2.99	3.175	0.073	0.2498, 0.2243	0.0747, 0.0316
Resin 4	3.05	3.139	0.071	0.2639, 0.2217	0.0655, 0.0308
Resin 5	3.10	3.111	0.070	0.2489, 0.2202	0.0626, 0.0307

2.788, 손실은 0.054의 값을 보이며, SLA 프린터에 사용되는 Resin의 경우 유전율 3.142, 손실은 0.071의 값을 갖는 것으로 파악하였다.

References

- [1] J. H. Kim, Y. G. Yoon, M. D. Kim, and Y. J. Jeon, "Technology trends of millimeter wave band propagation in the 5G/IoT era: Development of harmonized site-general path loss model", *The Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 4, pp. 45-53, 2017.
- [2] J. Han, W. Kim, G. Shin, J. Park, W. Chang, and I. J. Yoon, "Electrically equivalent model design of a Ku-band helical antenna matching section for ease of 3D printing technology use," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 7, pp. 599-606, Jul. 2020.
- [3] G. P. L. Sage, "3D printed waveguide slot array antennas," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1258-1265, Mar. 2016.
- [4] Rohde & Schwarz, "Measurement of dielectric material properties: Application note," 2012. Available: https://www.rohde-schwarz.com/kr/applications/measurement-of-dielectric-material-properties-application-note_56280-15697.html
- [5] H. Suzuki, T. Kamijo, "Millimeter-wave measurement of complex permittivity by perturbation method using open resonator," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, no. 12, pp. 2868-2873, Dec. 2008.
- [6] H. Suzuki, T. Kobayashi, H. Takino, and T. Nojima, "New complex permittivity measurement method at low frequency for measuring low-loss materials using high Q-value LC resonator immersed in liquid nitrogen," in *2011 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Hangzhou, May 2011, pp. 1-4.
- [7] P. I. Deffenbaugh, R. C. Rumpf, and K. H. Church, "Broadband microwave frequency characterization of 3-D printed materials," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 3, no. 12, pp. 2147-2155, Dec. 2013.
- [8] W. J. K. Raymond, C. K. Chakrabartym, G. C. Hock, and A. B. Ghani, "Complex permittivity measurement

- using capacitance method from 300 kHz to 50 MHz," *Measurement*, vol. 46, no. 10, pp. 3796-3801, Dec. 2013.
- [9] L. Nov, J. Y. Chung, "Dielectric property characterisation of thin films based on iterative comparison of full-wave simulations and measurements," *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 14, no. 10, pp. 992-996, 2020.
- [10] H. Zheng, C. E. Smith, "Permittivity measurements using a short open-ended coaxial line probe," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 1, no. 11, pp. 337-339, Nov. 1991.
- [11] M. S. Hilario, B. W. Hoff, B. Jawdat, M. T. Lanagan, Z. W. Cohick, and F. W. Dynys, et al., "W-band complex permittivity measurements at high temperature using free-space methods," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 1011-1019, Jun. 2019.
- [12] J. S. Kang, J. H. Kim, C. Cho, and D. C. Kim, "W-band permittivity measurements using a free-space material measurement technique," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 3, pp. 253-258, Mar. 2013.
- [13] A. Davidson, K. Jones, and E. Strid, "LRM and LRRM calibrations with automatic determination of load inductance," in *36th ARFTG Conference Digest*, Monterey, CA, Nov. 1990, pp. 57-63.
- [14] 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.
- [15] R. B. Marks, "A multiline method of network analyzer calibration," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 39, no. 7, pp. 1205-1215, Jul. 1991.
- [16] P. G. Bartley, S. B. Begley, "Improved free-space *S*-parameter calibration," in *2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, Ottawa, ON, May 2005, pp. 372-375.
- [17] J. Baker-Jarvis, "Transmission/reflection and short-circuit line permittivity measurements," *Electromagnetic Fields Division, Electronics and Electrical Engineering Laboratory*, NIST, Boulder, CO, Tech. Rep. 1341, 1990.
- [18] Rohde & Schwarz, "R&S® ZVA vector network analyzer specification," 2014. Available: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/ZVA_dat-sw_en_5213-5680-22_v1100.pdf

윤 대 영 [아주대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4811-4969>



2018년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2018년 3월~현재: 아주대학교 AI 융합네트워킹학과 석·박사 통합과정

[주 관심분야] 레이돔 및 RCS 해석

김 지 형 [한화시스템/전문연구원]

<http://orcid.org/0000-0002-3854-3145>



2009년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2016년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)

2016년 3월~2016년 9월: 한화탈레스(주) 전문연구원

2016년 9월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, 레이돔 전자파해석

윤 나 내 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9703-5335>



2019년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학박사)

2018년 12월~2019년 12월: 한국전기연구원 Post-Doctor

2020년 3월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원

[주 관심분야] 안테나, 배열안테나, 위상배열안테나, 초고주파 회로 설계 등

우 대 응 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6718-9122>



2007년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (공학사)

2013년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2013년 4월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 위상배열안테나, 슬롯배열안테나, 주기구조, Direction-Finding

오 경 현 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7715-8995>



1998년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2010년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)

1998년 2월~2015년 6월: 삼성탈레스(주) 수석연구원

2015년 7월~현재: 한화시스템(주) 수석연구원

구원

[주 관심분야] 밀리미터파 안테나, 배열 안테나, 빔조향 배열안테나

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2003년 2월~2006년 8월: KT인프라연구소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과/AI 융합네트워크학과 교수

[주 관심분야] 안테나, 전자장 해석, 레이다