

전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템을 이용한 GFRP의 유전율 분포 가시화

현종민* · Hasan Ahmed* · 이정률*[†]

Visualization of Permittivity Distribution in GFRP using Full-Field Scanning Free Space Measurement System

Jong-Min Hyun*, Hasan Ahmed*, Jung-Ryul Lee*[†]

ABSTRACT: This paper visualizes the full-field permittivity distribution at the standard specimens having known electromagnetic characteristics using a scanning free space measurement (SFSM) system. First, in the two Teflon specimens with different thicknesses, the real and loss tangent of permittivity could be measured and the results agreed to the theoretical and other measurement values. Then the system has been applied to Glass/epoxy and visualized different permittivity distribution depending on the material kind. Therefore, this approach will overcome the point measurement limitation of FSM and can be used for even sub-structural full-field electromagnetic evaluation of stealth and radome structures.

초 록: 본 연구에서는 스캐닝 자유공간 측정 시스템을 이용하여 전자기적 특성을 가지는 표준 시편에 대한 전영역 유전율 분포를 가시화한다. 먼저 테플론 두께 차이에 따라, 유전율 측정 결과, 유전율 실수와 손실정점 측정결과가 두께변화에도 타측정과 이론치와 비교하여 신뢰할 수 있는 결과를 획득하였고 이어 Glass/epoxy 시편에 적용하여 재료에 따라 다른 유전율 분포가 나타나는 것을 제시하였다. 스캔영역을 통해, 시편 전영역에 대한 유전율 분포를 가시화 할 수 있었으며, 재료 물성 평가를 넘어 레이돔 혹은 스텔스 구조 규모의 대상체에도 적용할 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템(Full-Field scanning free space measurement system), 표준 시편(Standard specimen), 유전율(Permittivity), 전자기파(Electromagnetic wave), 가시화(Visualization), 스텔스(Stealth)

1. 서 론

전자파 간섭과 전파 암실, 스텔스 기술 등의 분야에 전자파 흡수체에 대한 다양한 요구 조건이 존재한다[1]. 특히, 스텔스 구조에 적용되는 표준 시편은 재료 및 구조에 따라 다른 전자기적 특성을 가지고 있다[2]. 재료의 전자기적 특성을 나타내는 물성치로 유전율과 투자율이 있으며 각각

실수와 허수부로 구성된다. 실수부는 전파흡수구조의 전자기 에너지 저장을 나타내며, 허수부는 전자기 에너지 손실을 나타낸다[3]. 전자기적 에너지의 손실 척도를 표시하기 위해 손실정점을 사용하며, 위의 특성을 이용하여 스텔스 구조 설계에 적용한다[4].

전파흡수구조에 필요한 전자기적 특성을 측정하기 위해 여러 측정 시스템을 이용한다. 그 중, 안테나를 이용하여 비

Received 7 March 2018, received in revised form 24 April 2018, accepted 9 May 2018

*Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

[†]Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Corresponding author (E-mail: leejrr@kaist.ac.kr)

접촉, 비파괴 방식으로 측정하는 자유공간 측정 시스템이 많이 이용되고 있다. 공기 중에 산란되는 전자기파로 인하여 약간의 오차가 존재하지만, 비접촉식 방법으로 비교적 큰 시편에 대해서도 측정이 가능하며, 평판 및 곡률 구조에 대해서도 측정이 가능하다[5]. 실제 스텔스 구조의 경우, 안테나를 통해 측정되는 반사 및 투과손실이 중요하며 이를 자유공간 측정 시스템을 통해 확인 할 수 있다. 그러나, 현재까지 자유공간 측정 시스템은 한 점에서의 측정을 통해 재료적 물성을 평가하고 있어, 시편 혹은 서브구조의 위치별 전자기적 특성 평가에 한계가 있다. 따라서, 시편 전체에 대한 전자기적 특성을 평가 할 수 있는 기술 연구가 필요하다.

본 논문에서는 전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템을 이용하여 표준 시편의 유전율 분포를 가시화 한다. 개발된 시스템을 이용하여 표준 시편 테플론과 Glass/epoxy 대한 유전율 측정을 진행하여 신뢰성을 확인한다. 마지막으로, 테플론 6 mm와 Glass/epoxy 대한 X-band (8.2-12.4 GHz) 영역에서의 유전율 분포를 가시화하고, 다른 재료에 따른 유전율 분포 결과를 비교한다.

2. 전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템

Fig. 1은 개발된 전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템(Full-field scanning free space measurement system: Full-field SFSM system) 을 보여준다[6]. 시스템을 구성하기 위해 먼저 자유공간 측정 시스템을 구성한다. Focused horn antenna 이용하여 산란되는 전자기파를 최소화하고 focal length 부근에서 평면파를 만들어 측정 결과의 정확성을 향상 시킨다. Focused horn antenna 통해 송수신 되는 전자기파에 대하여 시편의 반사손실(Reflection loss, S_{11})과 투과손실(Transmission loss, S_{21})을 측정한다. 사용된 교정법은 GRL (Gated-Reflect-Line) 교정법이며, 내장된 소프트웨어를 이용하여 유전율 및 투자율을 계산하게 된다[7].

Fig. 2는 개발된 자유공간 측정 시스템에 2축 선형 스테이지를 결합한 전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템의 가시화 알고리즘을 보여준다. 수직 스테이지 bracket 위에 sample holder가 고정되어 있으며, 수직 스테이지가 수평 스테이지 위에 올라가 x-y 평면으로 이동하며 시편을 측정한다. 자

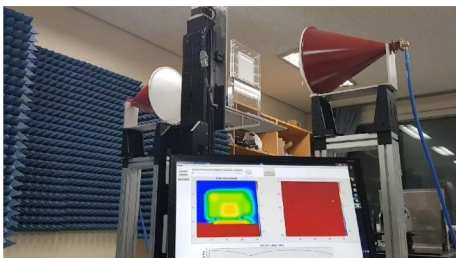


Fig. 1. Full-field dual port SFSM system [6]

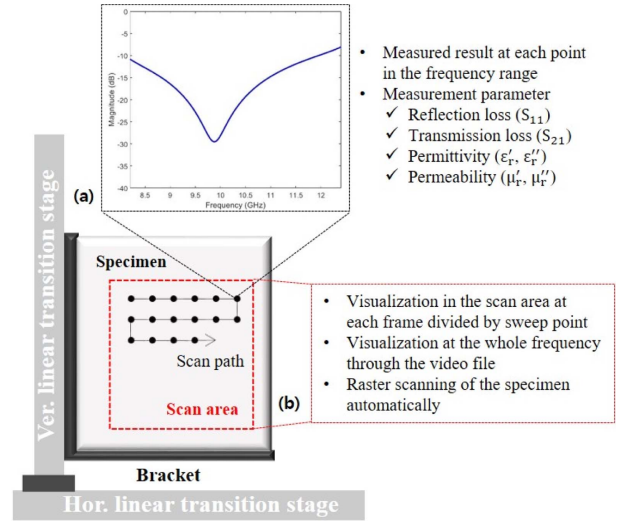


Fig. 2. Electromagnetic characterization algorithm in frequency domain using the Full-field SFSM system

유공간 측정 시스템 사이에 2축 선형 스테이지를 놓고 raster scan 방식으로 한 점에 대한 전자기 특성 측정 후, 다음 포인트로 이동하여 측정한다. 각 점에 대하여 벡터 네트워크 분석기 및 내장된 소프트웨어와 연동하여 자동으로 측정 진행되며, 실시간 가시화 할 수 있도록 구성한다[8]. 측정 데이터는 Fig. 2(a)와 같이 한 점에서 주파수에 따른 신호 변화를 측정하는 A-scan과 (b)에서 x-y 스캔 영역 안에서 두께 방향에 대한 주파수별 전자기적 특성을 측정하고 가시화 할 수 있는 C-scan 알고리즘을 적용한다.

3. 표준 시편 유전율 측정

3.1 테플론 두께 차이에 따른 유전율 측정

테플론은 2-2.1 유전율 실수 값과 낮은 손실정점(<0.005)을 가지는 특징이 있다[9]. 이에, 테플론 3 mm와 6 mm 시편에 대한 유전율 측정을 시편 가운데 한 점에서의 5번 반복 측정을 하여 평균과 편차를 확인하고, 참고문헌과 비교하였다.

Table 1은 두께 차이에 따른 테플론 유전율 측정 결과에 해당한다. 테플론 3 mm와 6 mm에서의 유전율 실수는 $2.0602 \pm 2.35\%$ 와 $2.057 \pm 2\%$ 로 거의 일치하며, 참고문헌[9]에서 자유공간 측정 시스템을 이용하여 측정한 테플론 결과와도 유사하다. 손실정점은 테플론 3 mm와 6 mm에서 0-0.0035

Table 1. Teflon permittivity at two different thicknesses

	Permittivity	
	Real	Loss tangent
Teflon (t: 3 mm)	$2.06 \pm 2.35\%$	0-0.0035
Teflon (t: 6 mm)	$2.057 \pm 2\%$	0-0.0096
Ref. [9] (t: 3 mm)	$2 \pm 3\%$	± 0.005

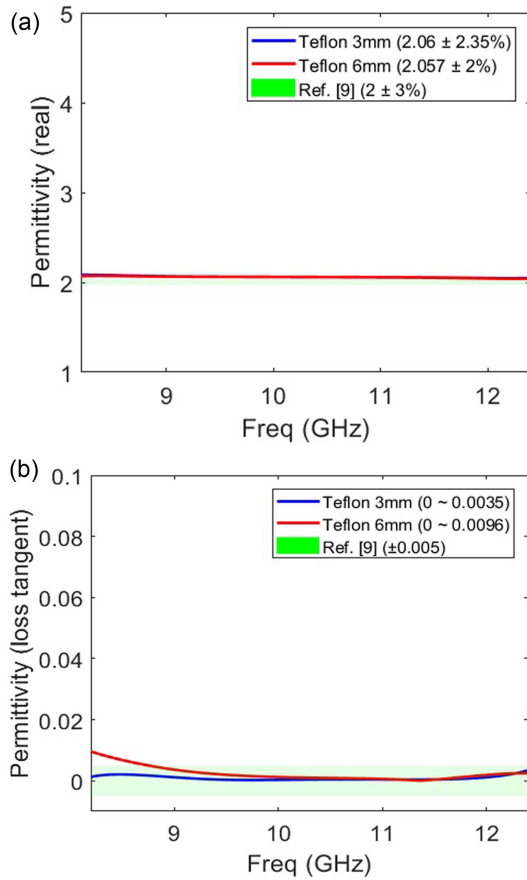


Fig. 3. Teflon permittivity results; (a) Real (b) Loss tangent

와 0-0.0096으로 매우 작은 차이를 보이며 참고문헌에서 제시한 손실정점 영역에 근접하다. 따라서 두께 차이에 큰 영향을 받지 않고 고유의 유전율을 가지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 3에서 측정 결과를 그래프로 나타냈을 때, 참고문헌 [9]와 유사한 신뢰성 높은 측정 결과를 유전율 실수와 손실정점에서 모두 확인할 수 있다. 유전율 실수는 두께 차이에 상관없이 거의 일정하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 손실정점의 경우 8-9 GHz 사이에서 약간의 차이가 있지만 대부분 일치하였다. 손실정점의 경우 테플론의 값이 매우 작기 때문에 측정 환경 및 교정법에 따라서 차이가 존재할 수 있기 때문에, 약간의 오차가 존재한다.

3.2 Glass/epoxy 유전율 측정

Glass/epoxy는 유리섬유강화플라스틱으로 GFRP(Glass fiber reinforced plastics)로 명칭하며, 재료에 따른 유전율 측정 결과를 확인하기 위해 Glass/epoxy 시편(180 × 200 × 1.869 mm)에 대한 유전율 측정을 진행한다. 참고문헌의 자유공간 측정 시스템으로 측정한 결과와 비교하였다.

Table 2는 Glass/epoxy 시편에 대하여 본 연구실에서 개발한 시스템과 참고문헌[9]의 자유공간 측정 시스템을 이용

Table 2. Glass/epoxy permittivity

Glass/epoxy (t: 1.869 mm)	Permittivity	
	Real	Imaginary
Measured result	4.7829 ± 4%	0-0.085
Ref. [9]	4.5882 ± 3%	0.048-0.104

Table 3. Glass/epoxy permittivity at 10 GHz

Permittivity	Glass/epoxy (t: 1.869 mm)			
	Measured result	Ref. [9]	Permittivity error and error factor	
Real	4.7842	4.5867	Error Factor	4.13%
Imaginary	0.0656	0.08337	Error	0.01777

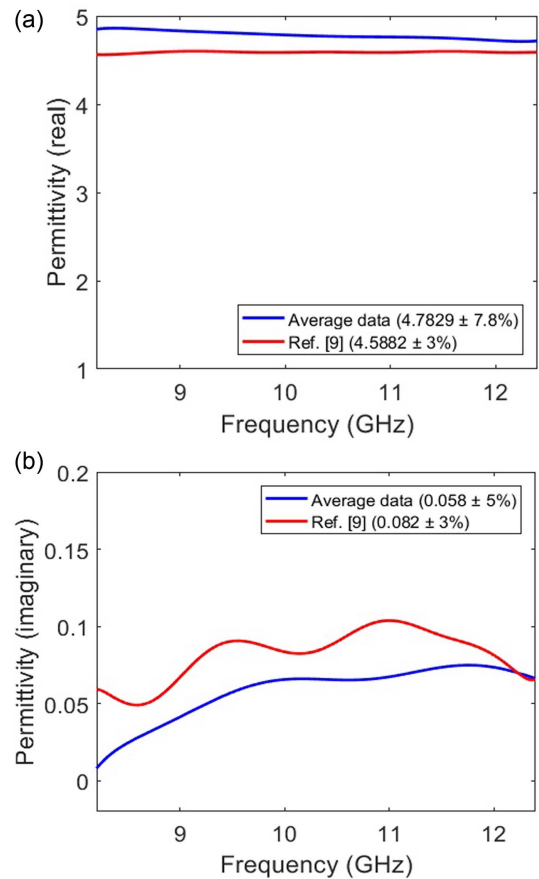


Fig. 4. Glass/epoxy permittivity results; (a) Real (b) Imaginary

한 결과에 해당한다. 유전율 실수의 경우, 4.7829 ± 4%로 참고문헌에서 측정된 4.5882 ± 3%와 유사하다. 이는, 유전율 허수에서도 유사하게 나오는 것을 위의 테이블을 통해 알 수 있다.

Table 3은 10 GHz에서의 유전율 실수와 허수의 측정 결과이며, 각 실수 및 허수에 대한 오차율과 오차에 해당한

다. 10 GHz에서 유전율 실수는 4.7842로 참고문헌의 4.5867과 약 4.13% 오차를 보이고 있다. 이는, 매우 유사한 결과로 볼 수 있다. 손실정점의 경우, 0.0656이며 0.08337의 참고문헌 결과와 0.01777 오차를 보이고 있어, 거의 오차가 없다고 볼 수 있다.

Fig. 4에서 측정 결과를 그래프로 나타냈을 때, 유전율 실수 및 허수 모두 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 유전율 실수의 경우, 참고문헌 시스템 측정 결과보다 약간 높게 측정되었지만 전체적으로 비슷한 결과를 나타냈으며, 유전율 허수에서도 확인 할 수 있었다. 테플론과 비교하였을 때, Glass/epoxy가 전체적으로 높은 유전율 값을 가지며, 재료에 따라서 다른 유전율 값을 가지는 것을 측정 결과를 통해 확인할 수 있었다.

4. 표준 시편 유전율 분포 가시화

테플론 6 mm와 Glass/epoxy에 대한 유전율 분포를 개발된 전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템을 이용하여 가시화 한다. Table 4는 스캔 수행 조건이다. 스캔 영역은 시편, sample holder, 공기 모두 포함되도록 400 × 400 mm로 설정하였으며, 스캔 간격은 가장 높은 해상도인 10 mm 간격으로 진행하였다. 다른 재료에 따라 유전율 분포 가시화 결과를 비교하여, 측정 결과를 분석한다.

Fig. 5는 10 GHz에서 가시화된 테플론 시편의 유전율 실수 및 허수 분포에 해당한다. 빨간색 실선은 시편과 sample holder 경계 부분에 해당하며, 검은색 점선은 테플론 시편의 위치에 해당한다. Sample holder 가운데 뚫려있는 부분에 테플론이 위치하고 있다. 노란색 점선은 스캔 영역 안에서의 분포 결과를 확인하였을 때, 빨간색 실선을 기준으로 시편과 sample holder 사이에 다른 유전율 실수 & 허수 분포가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는, 빨간색 점선은 sample holder와 공기 경계를 기준으로 다른 유전율 분포가 가시화 되는 것을 알 수 있었다.

빨간색 실선을 기준으로, 시편안에서는 일정한 유전율 분포가 나타나는 것을 알 수 있다. 칼라 스케일을 통해 유전율 실수는 $2.06 \pm 2.35\%$ 안에 시편 영역이 가시화 되는 것을 알 수 있다. 유전율 허수는 0-0.0035이므로 대부분 0에 가깝기 때문에 가시화 결과에서 진한 파란색으로 가시화 된다.

Table 4. Measured conditions of SFSM system

Scan area (mm) (W × H - Int)	400 × 400 - 10
Sweep point	801
Focal length (mm)	430 ± 15
Frequency range	X-band (8.2-12.4 GHz)
Spot diameter (mm)	60
Scan interval (mm)	10 (Overlap: 79%)

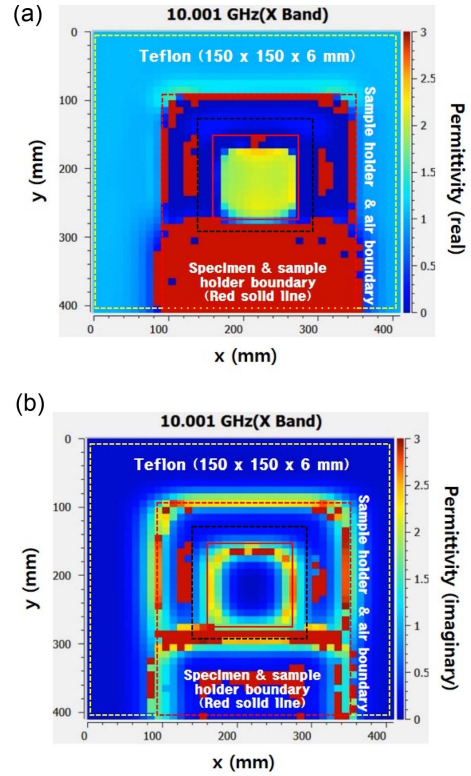


Fig. 5. Teflon (t: 6 mm) distribution visualization at 10 GHz; (a) Permittivity (real) (b) Permittivity (imaginary)

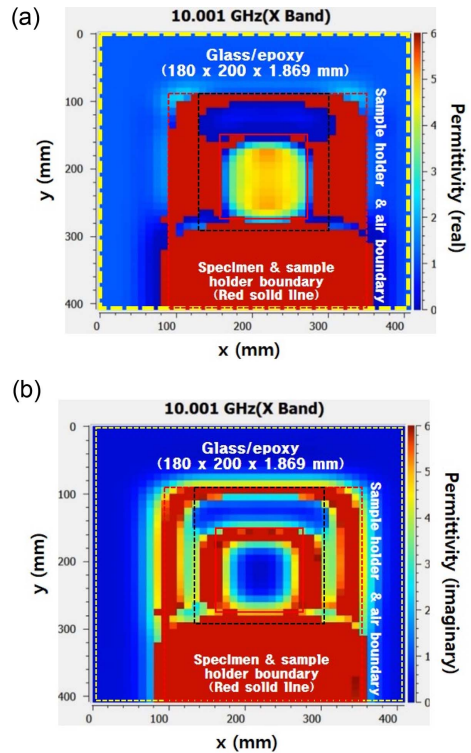


Fig. 6. Glass/epoxy distribution visualization at 10 GHz; (a) Permittivity (real) (b) Permittivity (imaginary)

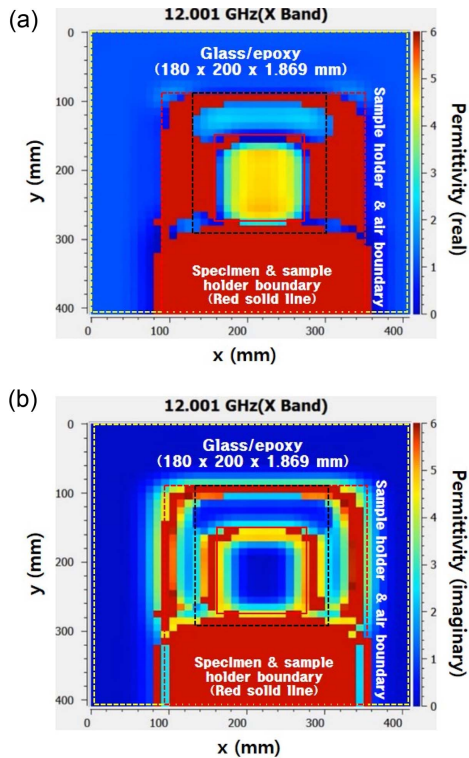


Fig. 7. Glass/epoxy distribution visualization at 12 GHz; (a) Permittivity (real) (b) Permittivity (imaginary)

Fig. 6은 10 GHz에서 가시화된 Glass/epoxy 시편의 유전율 실수와 허수 분포에 해당한다. 각 경계를 기준으로 다른 유전율 분포가 나타나는 것을 테플론 결과와 마찬가지로 알 수 있었다. 칼라 스케일을 통해 유전율 실수는 $4.7829 \pm 4\%$ 범위 안에 시편이 가시화 되는 것을 알 수 있다. 유전율 허수는 0-0.085이므로, 테플론과 같이 대부분 0 근처의 값을 가진다. 이러한 결과가 실제 가시화 된 결과를 통해서도 확인 할 수 있었다.

Fig. 7은 12 GHz에서의 가시화된 Glass/epoxy 시편 유전율 실수와 허수 분포에 해당한다. 개발된 Dual port SFSM 시스템은 X-band 전주파수에서 0.005 GHz 샘플링 간격으로 Fig. 6과 Fig. 7과 같은 전영역 분포를 가시화하며 Fig. 6과 Fig. 7은 주파수 변화에 따른 분포 변화 동영상에서 두 주파수에 서만 프레임을 추출하여 제시한 결과이다. 이를 통해, 시편 전체에 대한 유전율 분포를 가시화 할 수 있으며, 재료 및 구조에 따라 다른 유전율 분포를 나타나게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 자유공간 측정 시스템의 한계점을 개선하기 위해 2축 선형 스테이지를 결합하여 시편 전 영역에서의 측정이 가능한 전영역 스캐닝 자유공간 측정 시스템을 이용하여 Glass/epoxy 평판에 대한 유전율 분포

를 가시화 하였다.

먼저 표준 시편으로서의 테플론 두께 차이에 따른 유전율 측정을 통해 신뢰성 높은 결과를 도출하였으며, 레이돔 구조에 주로 사용되는 Glass/epoxy에서 측정을 이어 진행하여 재료에 따라 다른 유전율 결과를 가시화 할 수 있었다. 또한, 시편에 대한 전자기적 특성 분포를 가시화 할 수 있으며, 재료에 따라 다른 유전율 분포를 가시화할 수 있었다. 앞으로 스텔스에 적용되는 전파흡수구조 시편에 대한 시편 및 서브구조에서 전영역으로 전자기적 특성을 실시간으로 가시화하는 응용에도 활용될 예정이다.

후 기

이 연구(논문)은 2017년 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(NRF-2017R1A5A1015311).

REFERENCES

- Choi, J.H., Nam, Y.W., Kim, C.G., and Lee, W.J., "Microwave Absorbing Structure Using Semiconductive Fiber Reinforced Composite," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 29, No. 3, 2016, pp. 98-103.
- Son, D.S., Hyun, J.M., Lee, J.R., and Lee, W.J., "Optimization of the Design of Radar-Absorbing Composite Structures using Response Surface Model with Verification using Scanning Free Space Measurement," *Journal of Composite Structures*, Vol. 186, 2018, pp. 106-113.
- Lederer, P.G., *An Introduction to Radar Absorbent Materials (RAM)*, Royal Signals and Radar Establishment, London, 1986.
- Panwar, R., and Lee, J.R., "Progress in Frequency Selective Surface-Based Smart Electromagnetic Structures: A Critical Review," *Journal of Aerospace Science and Technology*, Vol. 66, 2017, pp. 216-234.
- Ghodgaonkar, D.K., Varadan, V.V., and Varadan, V.K., "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, 1990, pp. 387-394.
- Hyun, J.M., Ahmed, H., and Lee, J.R., "Development of Dual Port Scanning Free Space Measurement System," *Measurement Science and Technology*, Vol. 29, No. 7, 2018.
- Bartley, P.G., and Begley, S.B., "Improved Free-Space S-Parameter Calibration," *Proceeding of Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, 2005, pp. 372-375.
- Ahmed, H., Hyun, J.M., Lee, J.R., and Lee, W.J., "Development of Scanning Free-Space Measurement Setup and Its Application to Structural Imaging," *Proceeding of the Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management Society 2017*, Jeju, Korea, July, 2017.
- MMS (2011), "Free Space Measurement Systems", Accessed Jan 10, 2018, <http://www.mmstech.com/free-space-systems.aspx>.