

항공우주용 다층 레이돔의 전자기 특성 분석을 위한 저비용 자유공간 측정 솔루션

A Low-Cost Free-Space Solution for Electromagnetic Characterization of Multilayer Aerospace Radomes

초록

본 논문은 항공우주용 다층 레이돔의 전자기 특성 분석을 위해, Time-Domain Gating(TDG) 최적화를 통합한 고정형 자유공간 측정법을 제안한다. 측정 시스템의 물리적 이동 없이 레이돔 전후면으로 참조면을 재정의하고 베이지안 최적화로 TDG 윈도우 파라미터를 자동 탐색해 다중 반사와 잡음 환경에서도 레이돔의 구조 및 층 수와 관계없이 일관된 측정을 가능하게 한다. 15층 이중 허니콤 SATCOM 레이돔 (10~15 GHz) 실험에서 기준 설계값 대비 S_{11} 의 오차 ≤ 0.40 dB, S_{21} 오차 ≤ 0.20 dB를 달성했으며, 교정 후 RMS 오차가 최대 99.62% 감소하였다. 제안법은 기존 방식 대비 절차의 복잡도와 비용을 크게 낮추면서 재현성 높은 항공우주용 레이돔의 전자기 특성 분석을 가능하게 한다.

Key Words : Radomes(레이돔), Free-space measurements(자유공간 측정), Electromagnetic characterization(전자기 특성), S-parameters(S-파라미터), Bayesian optimization(베이지안 최적화)

1. 서론

레이돔(Radome)은 항공우주 플랫폼의 안테나, 레이더 시스템을 외부 충격과 다양한 기상 요인 등으로부터 보호하는 동시에, RF 신호의 손실은 최소화하여 전파 투과를 저해하지 않도록 전기적 투명성을 지니는 구조물이다⁽¹⁾. 이러한 특성으로 인해, 레이돔은 위성, 항공기, 선박 등 다양한 이동체에 탑재되는 통신 및 레이더 시스템에서 핵심적인 역할을 수행하고 있다. 최근 위성 통신 인프라의 확장, 군사용 고성능 레이더 시스템의 발전, 항공 전자 장비의 고도화에 따라 안테나 시스템의 보호에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라, 레이돔은 메타물질(metamaterial), 주파수 선택 표면(FSS), 인공지능(AI)와의 결합을 통해 더욱 빠르게 발전하는 추세이다^(2~6). 결과적으로 다양한 다층 구조의 레이돔이 보급되면서 구조적 강도와 경량화는 향상되었지만, 실제 시편으로 제작 후에 층간 경계·공극·접착층 등에서 발생하는 다중 반사와 산란으로 인해 전자기 특성의 정밀 측정과 품질 보증이 어려워졌다^(4,7~13). 특히, 생산·정비(Maintenance, Repair, and Overhaul, MRO) 환경에서는 숙련도에 따른 편차와 측정 장치 재배치로 인한 반복 정렬 비용이 커, 저비용·고재현성의 측정 솔루션에 대한 수요가 높다. 레이돔의 전자기 특성은 S-파라미터 측정 결과를 기준으로 평가되며, 특히 반사계수(S_{11})와 투과계수(S_{21})로 특성화된다^(1,7). 특히, 레이돔의 고유 전자기 특성은 실제 운용 환경에서의 레이돔의 영향을 파악하고, 안테나 설계에 레이돔의 영향을 반영하기 위해 정밀한 측정을 통해 검증되어야 한다. 시편의 소형 정밀 가공이 필요한 T/R (Transmission/Reflect) 방식^(14~16), 반사계수만 측정 가능한 OECP(Open Ended Coaxial Probe) 방식⁽¹⁷⁾과 비교할 때, S_{11} 및 S_{21} 을 비접촉·비파괴 측정 방식으로 고정된 두 송수신 안테나 사이에 시편을 두고 측정하는 자유공간 측정법(Free-space measurement)이 레이돔의 전자기 특성 측정에 가장 적합하다^(18~20).

자유공간 측정법은 자유공간에서 기인하는 잡음과 측정 시스템의 다중 경로 반사를 보정하기 위해 복잡한 참조면 교정이 필수적이다^(9,21~22). 이는 3가지 주요 자유공간 교정법으로 분류되며 각 교정법에 필요한 측정 표준은 그림 1에 나타나 있다. 첫째, TRL(Thru-Reflect-Line) 교정은 안테나 간격의 정밀한 조정이 필요하며, 이 과정에서 발생할 수 있는 아주 작은 거리 오차나 정렬 편차조차 측정

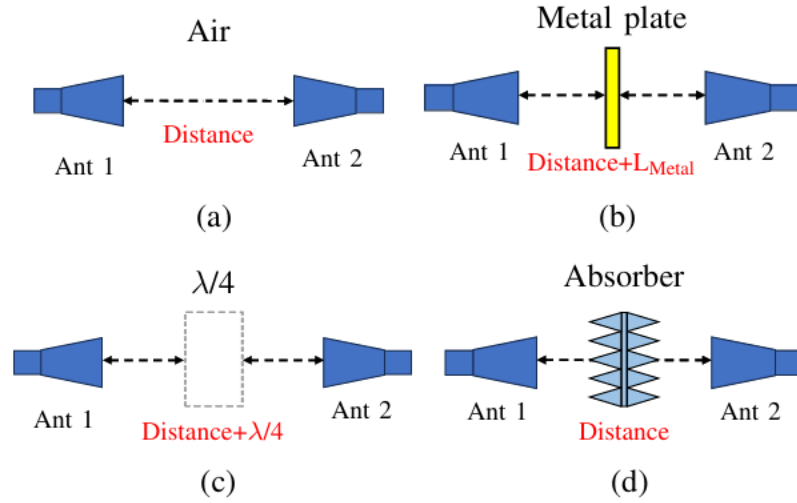


그림 1. 기존 참조면 교정을 위한 측정 표준

(a) Thru 표준, (b) Reflect 표준, (c) Line 표준, (d) Match 표준

정확도에 직접적인 영향을 줄 수 있다^(9,21~22). 둘째, TRM(Thru-Reflect-Match) 교정은 흡수체(absorber)의 주파수 의존적 특성과 반사로 인해 완벽한 정합 표준을 달성하는 데 어려움이 있다⁽²³⁾. 마지막으로, GRL(Gated Reflect-Line) 교정은 2가지 측정 표준에 위상 보정과 Time-domain gating(TDG)을 적용하여 다중 반사를 억제하고 고정형 측정 시스템 구성을 가능하게 한다^(17,22). 따라서, 물리적 이동을 배제할 수 있는 GRL 교정이 대형 평판 레이돔의 측정에 가장 적합하다^(24,25). 그러나 GRL 교정 과정에서 사용되는 TDG는 표준화된 파라미터 설정 기준이 부재하여 사용자의 주관적인 판단에 의존하며 수동 튜닝만으로는 일관된 최적의 TDG 설정이 어렵다. 게다가 다층 레이돔의 경우, 반사·누설 경로가 많아 다중 반사와 잡음이 중첩되어 TDG 파라미터의 최적화를 더욱 복잡하게 만든다. 이를 해결할 수 있는 가장 최신의 방식은, 고비용의 상용 TDG 소프트웨어를 사용하는 것이다. 하지만 이는 수출 통제(Export License, EL) 문제와 결합되어 있어 현장 적용성이 낮으며 비용적인 부분에서 효율성이 떨어진다.

본 논문에서는 Time-Domain Gating 최적화 기반의 고정형 자유공간 측정법을 제안하여, 항공우주용 다층 레이돔의 고유 전자기 특성을 분석할 수 있도록 정확도, 재현도, 비용을 동시에 개선하는 저비용 솔루션을 제공하는 것을 목표로 한다. 핵심 아이디어는 수학적 참조면 교정을 통해 기존 참조면 교정법의 물리적 이동의 필요성을 없애고, TDG 파라미터의 구체적인 설정 기준을 제시하여 사용자의 주관적 판단에 측정 재현도가 일관되도록 하는 것이다. 더 나아가, 베이지안 기반의 TDG 파라미터 최적화를 도입하여 레이돔의 설계값과 가장 유사한 측정을 이루어 낼 수 있도록 정확도를 향상시킨다. 이와 관련한 이론적 배경은 2장에서 제시되며, 3장에서는 15층 2중 허니콤 코어 SATCOM(Satellite Communication)용 레이돔을 이용한 실험적 검증에 대해 논의와 기존의 자유공간에서 측정된 레이돔과의 결과 비교를 통해 연구의 타당성을 제시하고 향후 적용 범위를 제안한다.

2. 제안하는 고정형 자유공간 측정법

2-A. 참조면 교정 (Reference Plane Calibration)

자유 공간 측정에서, 안테나와 레이돔 사이의 전파 경로는 평면파 근사에 기반한 균일한 전송선로로 간주된다⁽²⁶⁾. 이러한 가정을 만족시키기 위해서는, 안테나와 측정 시스템 중심까지의 거리(r) 사이의 고정 거리가 파장(λ)과 최대 안테나 직경(D)보다 커야 하며, 아래의 원거리장(far-field) 조건을 만족해야 한다 (식 1).

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

또한 집중형 렌즈 안테나를 사용할 경우, 안테나 거리가 유효 초점거리를 만족하도록 조정해야 한다 (식 2). 또한, 에지(edge) 회절을 무시할 수 있을 정도로 레이돔 시편(D_{Radome})의 크기가 충분히 커야 하며, 이는 안테나의 반 전력 빔폭에 해당하는 빔 직경(θ_{HPBW})보다 커야 한다^(19,27).

$$D_{radome} \geq k \cdot r \cdot \tan\left(\frac{\theta_{HPBW}}{2}\right) \quad (2)$$

여기서 k 는 안전 계수로 일반적으로 1.2 이상이 권장된다. 두 조건이 만족되면, 레이돔의 반사 및 투과 특성을 분석을 위한 안테나 1에서 안테나 2로 전달되는 신호를 측정하는 자유공간 환경이 설정된다.

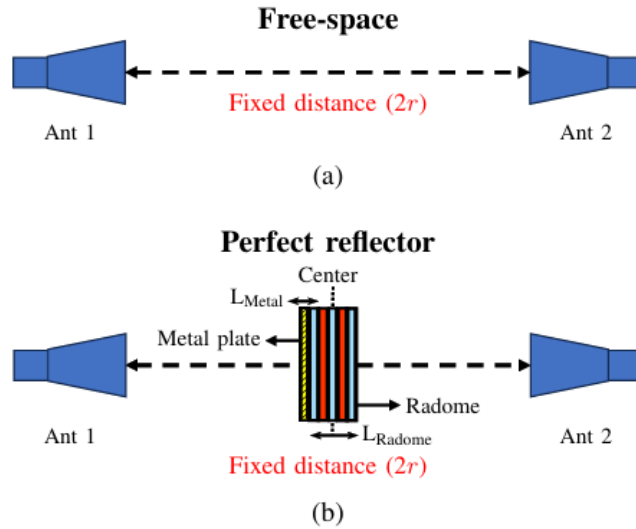


그림 2. 제안하는 고정식 자유 공간 측정을 위한 표준 구성
(a) 자유 공간(FS) 표준. (b) 완전 반사(PR) 표준.

제안하는 고정형 자유 공간 측정법은 그림 2의 자유 공간 표준(free-space, FS), 완전 반사(perfect reflector, PR) 표준, 그리고 분석 대상 레이돔의 측정 결과를 기반으로 한다. 먼저, FS 표준의 안테나 간 거리($2r$)는 (식 1)에서 정의한 값을 기준으로, 레이돔 시편 없이 측정된다. FS 표준에 대한 측정 S-파라미터 결과(S_{11}^{FS} , S_{21}^{FS})는 측정 시스템의 고유 반사 및 회절 특성을 포함하며, 이는 안테나 자체 반사와 외부 잡음 등도 포함된다⁽²⁶⁾. 이때 설정된 측정 시스템의 위치는 고정되며, 이후 추가적인 위치 조정이 불필요하다. 따라서, 레이돔과 안테나의 위치 재이동 또는 정렬 불일치에 따른 오차가 본질적으로 발생하지 않고 정밀 이동 장치가 필요하지 않아 측정 시스템 자체의 비용이 크게 절감된다.

다음으로, PR 표준 측정은 고정된 측정 시스템의 중심에 금속판과 함께 레이돔 시편을 겹쳐서 배치함으로써 수행된다. 오차를 최소화하기 위해 금속판의 두께(L_{Metal})는 파장보다 매우 작게 설정되며, 구체적으로는 $L_{Metal} \ll \frac{\lambda}{2\pi}$ 가 되도록 한다. PR 표준에 대한 측정 S-파라미터 결과(S_{11}^{PR} , S_{21}^{PR})는 레이돔 시편을 배치하였을 때 발생할 수 있는 추가적인 반사 성분 및 측정 시스템의 잡음을 분리하여 평가하는 데 사용된다. 이 표준은 Match 표준에서 흡수체를 사용하는 것에 비해 훨씬 간단하고 실용적이다. 마지막으로, 분석하고자 하는 레이돔 시편을 FS 표준을 측정할 때 사용했던 레이돔 앞면의 금속판만 제거하고 측정하여 레이돔의 S-파라미터 측정 결과(S_{11}^{Radome} , S_{21}^{Radome})를 얻는다.

2가지 측정 표준과 레이돔 측정 결과를 통해 얻어진 S-파라미터는 벡터 네트워크 분석기(VNA)를 이용한 기본적인 through-open-short-match(TOSM) 교정 절차로만 보정되므로, 이는 VNA에 연결된 케이블 및 커넥터의 고유 특성만을 보상하는 역할을 한다^(9,19,28). 정확한 레이돔의 고유 반사 및 전송 특성만을 분리해서 측정을 위해서는 케이블 끝이 아니라, 레이돔의 앞·뒷면으로 참조면을 옮겨주어야 한다. 이를 위해서는, 자유공간에서 기인하는 측정시스템의 잡음의 영향을 제거해야 하며, 그 방법으로 식 (3)에 제시된 참조면 교정 수식을 적용할 수 있다⁽²⁹⁾.

$$S_{11}^{cal} = -\frac{S_{11}^{Radome} - S_{11}^{FS}}{S_{11}^{PR} - S_{11}^{FS}} \quad (3-1)$$

$$S_{21}^{cal} = -\frac{S_{21}^{Radome} - S_{21}^{PR}}{S_{21}^{FS} - S_{11}^{PR}} e^{-j\left(\frac{\omega}{c}\right)L_{Radome}} \quad (3-2)$$

S_{11} 의 보정에서는, 측정 시스템에서 발생하는 추가적인 반사 성분을 완전 반사 표준을 기준으로 보상함으로써, 참조면을 레이돔 시편의 전면으로 이동시킬 수 있다 (식 3-1). 마찬가지로, S_{21} 은 두 가지 보정 표준을 활용하여 결정되며, 레이돔을 통과하는 전파에 의해 유도된 위상 변화는 위상 보정 항 $e^{-j\left(\frac{\omega}{c}\right)L_{Radome}}$ 을 적용하여 교정할 수 있다 (식 3-2). 여기서 ω 는 각주파수, c 는 진공 중 빛의 속도, L_{Radome} 은 레이돔 두께이다. 이 교정 방법은 참조면을 레이돔 시편 후면으로 재정의한다. 교정된 안테나 및 측정 시스템에 수학적 참조면 교정 공식을 적용함으로써, 참조면을 정밀하게 이동시킬 수 있다. 이에 따라 기계적인 위치 재조정이나 반복 측정에 따른 불확실성을 제거할 수 있다. 따라서, 제안한 방법은 기준면 제어 정확성, 측정 재현성, 그리고 절차의 단순성 측면에서 기존의 TRM 및 TRL 교정 기법보다 분명한 장점을 제공한다.

2-B. Time-Domain Gating & 자동 파라미터 최적화 (Automated Parameter Optimization)

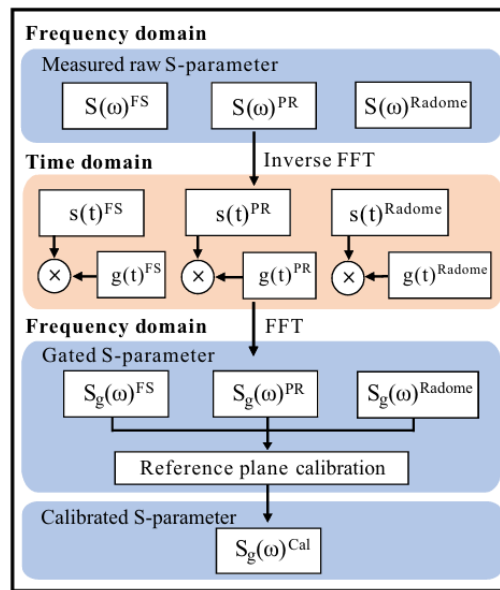


그림 3. Time-Domain Gating과 참조면 교정의 통합 프로세스

자유공간에서 얻은 FS/PR 표준과 레이돔의 측정 결과를 참조면 교정 공식에 바로 적용하면, 내부 시스템 반사, 외부 잡음, 그리고 유전체 계면의 임피던스 불연속에 의한 층간 다중 반사 성분이 직·간접 경로에 중첩되어 교정 오차가 발생할 수 있다⁽²⁵⁾. 따라서, 참조면 교정 전에 TDG를 이용하여 시간 영역에서 레이돔의 직접 상호작용 응답만 선택적으로 추출해야 한다⁽²⁸⁾. TDG는 이러한 간접 성분을 제거하여 레이돔의 고유 반사·투과 특성을 참조면 교정을 통해 안정적으로 추출하도록 돕는다.

현재 TDG 상용 솔루션은 수출 규제에 인한 장기간 대기 기간과 높은 비용적 부담이 있어 이를 대체하기 위해, Python으로 자동화된 TDG 파라미터 최적화 알고리즘을 개발하였다⁽³⁰⁾. VNA로부터 얻은 S_{11} 및 S_{21} 각각의 측정 결과에 대해, TDG 및 참조면 교정 통합 프로세스를 그림 3에 제시한 워크플로우에 따라 수행한다. 측정 주파수 범위는 타겟 대역폭보다 약 10% 넓게 설정하여, 고속 역푸리에 변환(IFFT) 과정에서 경계 불연속에 의해 발생하는 깁스(Gibbs) 현상을 완화한다. 이 방법은 시간 영역 신호에서 사이드로브(sidelobe) 진폭 증가로 인한 오류를 예방할 수 있다.

$$g(t) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right) \quad (4)$$

시간 영역 변환 이후, 게이팅 윈도우(gating window)를 선택적으로 적용하여 레이돔 시편 위치에 해당하는 시간 영역 내에서 의미 있는 반사·투과 응답만을 추출한다. 이 단계에서는 신호 에너지 분산을 최소화하고 우수한 사이드로브 억제 성능을 보이는 Blackman 윈도우 $g(t)$ 를 (식 4)에 따라 적용한다⁽³¹⁾. 이 방정식에서 T 는 전체 게이팅 윈도우 길이를 나타내며, t 는 연속적인 시간 변수를 의미한다. 여기서 $0 \leq t < T$ 인 시간 변수에 대해, 게이팅 윈도우가 적용된 S_{11} , S_{21} 은 고속 푸리에 변환(FFT)을 통해 다시 주파수 영역으로 변환되며, 이를 통해 참조면 보정을 위한 TDG 프로세스가 완성된다.

특히, 게이팅 윈도우의 중심(center)와 폭(span)은 TDG의 성능과 정확도를 결정하는 핵심 요소이다. S_{11} 의 경우, 윈도우 중심은 완전 반사 표준(S_{11}^{PR} , S_{21}^{PR})의 시간 영역 반사 신호 피크에 물리적으로 정렬시키며, S_{21} 은 자유 공간 표준(S_{11}^{FS} , S_{21}^{FS})의 시간 영역 투과 신호 피크에 정렬시킨다. 그러나 윈도우의 폭(span) 결정은 다층 레이돔에서 여러 층에 의한 다중 반사와 내부 시스템 간섭이 존재하기 때문에 본질적으로 설정이 복잡하고 민감하다. 또한, 다층 레이돔 측정에 적용 가능한 TDG 파라미터 설정 기준이 부재하므로, 측정 환경, 목표 사양, 운용자의 숙련도 등에 따라 경험적으로 수동으로 조절해왔다. 이러한 경험적 조정의 의존은 측정 재현성과 정확도의 저하 원인이 된다^(24,32).

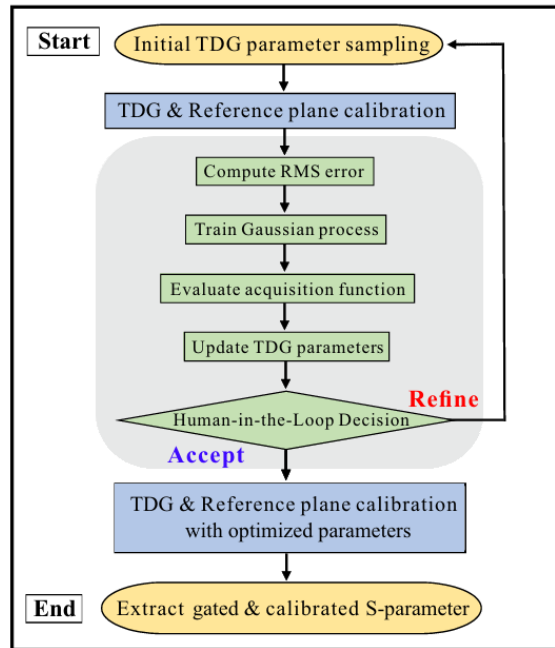


그림 4. 베이지안 최적화 기반 자동화된 TDG 파라미터 최적화 알고리즘

이러한 문제를 해결하기 위해, 베이지안 최적화(Bayesian Optimization, BO)에 기반한 자동화된 TDG 파라미터 최적화 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 측정 신뢰성과 재현성을 향상시키며, 그림 4에 그 알고리즘이 제시되어 있다. 제안된 최적화는 TDG 기준면 교정 결과와 기준 설계값 간의 제곱 평균 루트(RMS) 오차를 목적 함수로 정의함으로써, 잡음 환경에서도 견고한 최적화를 수행한다⁽³³⁾. 초기 최적화 단계에서는 초기값 기반 랜덤 샘플링을 통해 임의의 게이팅 윈도우의 폭을 생성하고 적용하여, 목적 함수가 이들 파라미터에서 평가되고 예비 데이터를 수집한다. 그 후, 가우시안 프로세스(Gaussian Process, GP)는 수집된 관측 데이터를 기반으로 목적 함수의 확률적 대리모델(Surrogate model)을 구축하여, 적은 평가 횟수로도 최적점에 수렴할 수 있도록 한다.

이 대리모델을 기반으로, 기대 개선(Expected Improvement, EI) 획득 함수는 자동으로 탐색(exploration)과 활용(exploitation) 간의 균형을 맞추며, 가장 높은 EI 값을 갖는 윈도우 폭을 현재 최적값에 따라 체계적으로 갱신·반복하여 기준 설계에 가장 근접한 보정 결과를 도출한다. 또한, 사용자

개입 (human-in-the-loop, HIL) 의사결정 메커니즘에 의해 최적화 과정에서 탐색 공간의 실시간 조절과 물리적으로 불가능한 영역의 배제가 가능하며, 실용적 제약 조건을 만족하는 동시에 해석의 시간 효율성도 향상된다⁽³⁴⁾. 그 결과, 제안된 TDG 파라미터 최적화 알고리즘은 레이돔 두께 또는 다층 구조와 무관하게 복잡한 반사 및 잡음 중첩 환경에서도 측정 데이터의 자동 처리 과정을 통해 S-파라미터의 정확한 측정을 달성할 수 있다.

3. 검증 및 성능 측정

3-A. 전자기 시뮬레이션

실험적 측정에 앞서, 제안한 전체 측정 시스템 구성, 참조면 교정 절차, 그리고 TDG와 파라미터 최적화의 효과를 검증하기 위해 전자기 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션은 CST Studio Suite®를 이용하여 두 가지 표준과 다층 레이돔 모두에 그림 2와 같이 실행되었다. 송신기(Tx)와 수신기(Rx)로 15 dBi 이득의 WR-75 혼 안테나 두 개를 사용하였으며, 동작 주파수는 10~15 GHz 대역이다. 안테나 간 거리는 700mm로 설정하였고, 이는 원거리장 조건을 만족함을 확인하였다. 레이돔 시편의 크기는 400 × 350mm로 설정하여 충분한 전자기장 커버리지를 확보하였다. 완전 반사판 표준은 0.796mm 두께의 구리판(면적 400 × 350mm)으로 구성하였다.

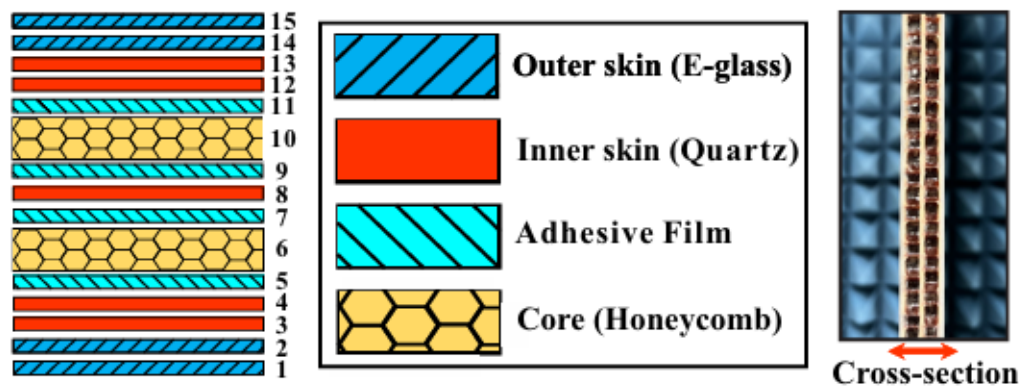


그림 5. 이중 코어 15층 SATCOM 레이돔의 재료 구성 및 층 배열, 그리고 제작된 구조의 단면도.

표 1. 재료 물성 및 각 레이돔 층의 두께

Material	Specification	ϵ	$\tan \delta$	Thickness (mm)
E-glass	BT250E-1/7781	4.54	0.0173	0.219
Quartz	BT250E-1/4581	3.26	0.0080	0.288
Adhesive Film	FM 300-2M	3.46	0.0371	0.145
Honeycomb	HRP	1.09	0.0028	4.572

측정 대상인 다층 레이돔은 10~15 GHz 대역에서 반사 계수 -6 dB 이하, 투과 계수 1.5dB 이하의 전기적 요구 성능을 만족하도록 설계된 SATCOM용 레이돔이다. 강도와 경량 특성을 만족하기 위해 미국 군사 규격 MIL-STD-7705B에 분류된 C-샌드위치 구조로 제작되었다. 저유전율 허니콤 코어 층과 고유전율 유전체 스킨(skin) 층을 번갈아 적층하여, 이중 코어 구조의 15층 레이돔이다. 재료 및 물성은 표 1에 상세하게 나타나 있으며, 각 층의 배열은 그림 5에 제시되어 있다.

반사 계수와 투과 계수는 Full-wave 전자기 시뮬레이션을 통해 주파수 영역에서 추출되었으며, 자유공간 표준, 완전 반사 표준, SATCOM 레이돔 등 세 가지 구성의 시뮬레이션 결과는 그림 6에 제시되어 있다. 이후 그림 7에 나타난 바와 같이, 고속 역푸리에 변환으로 얻은 시간 영역 응답을 분석한 결과, S₁₁의 경우 응답의 초기 부분은 안테나와 케이블, 커넥터 등 측정 시스템 내부에서 발생한

반사에 기인함을 알 수 있다. 반면, 응답의 후반부는 중첩된 다중 반사로 해석된다. 또한, S_{21} 에서는 시편을 통해 투과된 다양한 신호들이 중첩되어 있다.

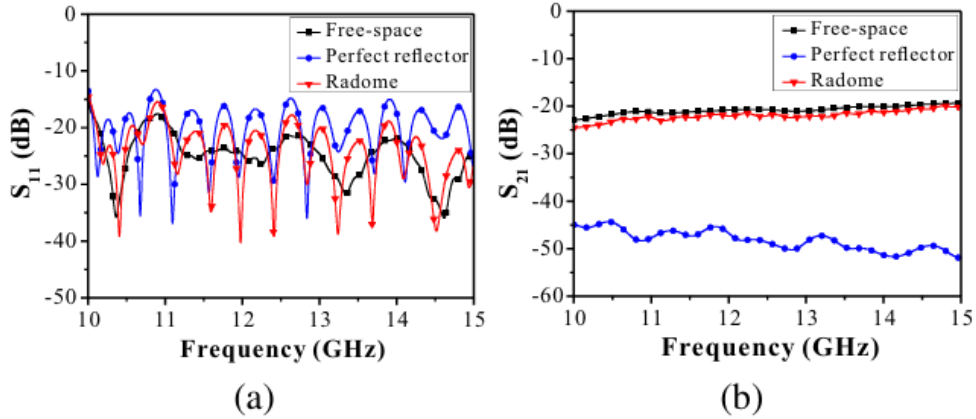


그림 6. 교정 전 주파수 영역의 자유공간에서 S_{11} 과 S_{21} 시뮬레이션 결과

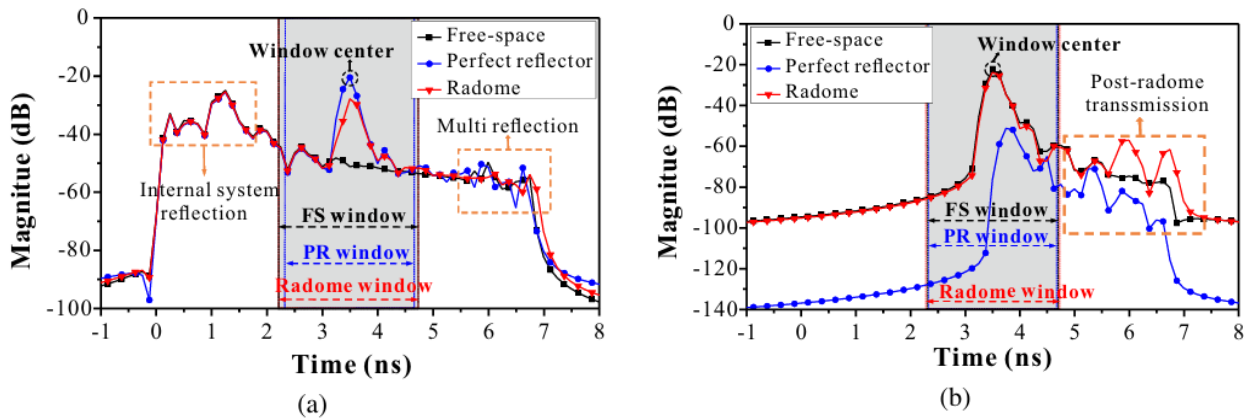


그림 7. 최적화된 TDG 파라미터를 표시한 시간 영역으로 변환된 S_{11} 과 S_{21} 결과

게이팅 윈도우의 중심은 S_{11} 의 경우 PR 표준을 기준으로 피크 지점인 3.497ns에 자동으로 정렬되었으며, S_{21} 의 경우 FS 표준을 기준으로 동일하게 3.497ns에 정렬되었다. 또한, 두 번의 HIL 의사결정 과정을 통해 S_{11} 과 S_{21} 각각의 윈도우 폭은 자동화된 TDG 파라미터 최적화로 1.5~2.5ns 범위에서 각각 최적화되었으며, 그 결과는 표 2에 요약되어 있다.

표 2. 시뮬레이션 결과에 대해 최적화된 게이팅 윈도우 폭

Standard	Free-Space	Perfect Reflector	Radome
S_{11}	2.499 ns	2.247 ns	2.496 ns
S_{21}	2.357 ns	2.227 ns	2.388 ns

참조면 교정과 자동화된 TDG 파라미터 최적화의 개별 영향을 체계적으로 평가하기 위해 각 기법을 독립적으로 적용하였다. 먼저, 그림 8(a)는 TDG 없이 참조면 교정 수식 (식 3)만 적용한 결과를 보여준다. 이 경우, 자유 공간 측정 시스템에서 발생하는 원치 않는 잡음 및 레이돔 내 다중 경계 반사 등 잔여 성분이 필터링되지 않고 그대로 남아 있다. 이로 인해 주파수 응답에 상당한 리플이 발생하며, 기준 설계값에서 S_{11} 은 최대 2.26 dB, S_{21} 은 최대 0.45 dB까지 편차가 나타났다. 이러한 리플은 레이돔의 고유한 전자기 응답 특성을 정확하게 분리하는 데 근본적인 장애가 된다.

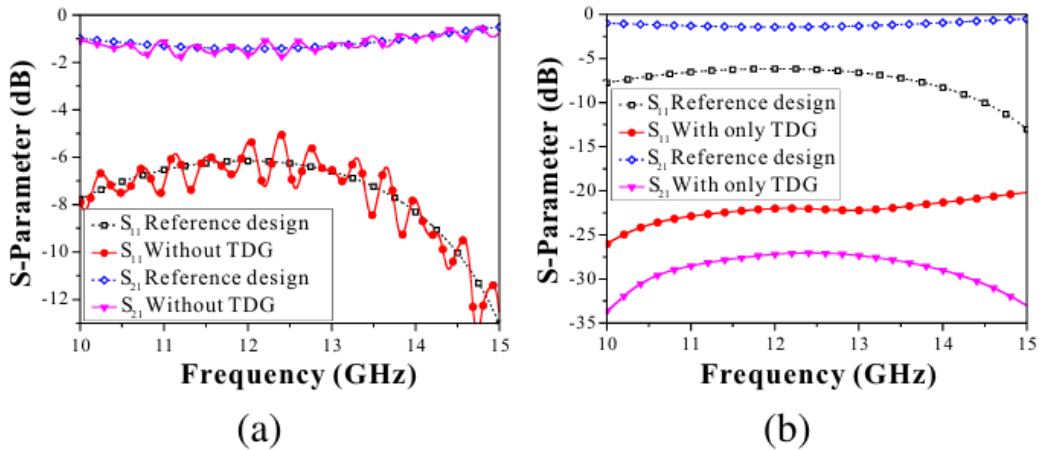


그림 8. (a) TDG 없이 참조면 교정만 적용한 경우의 S_{11} 및 S_{21} 비교.
(b) 참조면 교정 없이 TDG만 적용한 경우의 S_{11} 및 S_{21} 비교.

반면, 그림 8(b)는 BO 기반 자동화 TDG 파라미터 최적화 결과를 나타낸다. 이 기법은 참조면 교정 없이 레이돔 부근의 신호를 필터링하고 추출하기 위해 적용되었다. 시간 영역에서 불필요한 다중 반사 성분을 제거함으로써 주파수 응답의 리플은 크게 감소하였으나, 참조면 불일치로 인해 S_{11} 은 약 -25.8 dB, S_{21} 은 약 -25.0 dB의 오프셋이 관찰되었다. 이 결과는, 참조면 교정은 자유 공간 경로 효과로 인한 오차 및 위상 불일치를 효과적으로 제거하며, TDG는 신호 리플 제거 및 시간 영역에서 레이돔의 고유 반사 및 투과 성분의 분리에 탁월함을 보여준다. 따라서 두 기법을 결합해야 자유 공간 측정 결과에서 상호 보완적인 잡음 억제와 참조면 교정이 가능해지며, 레이돔의 고유 특성에 대한 정밀한 전자기적 특성 분석이 가능해짐을 확인할 수 있다.

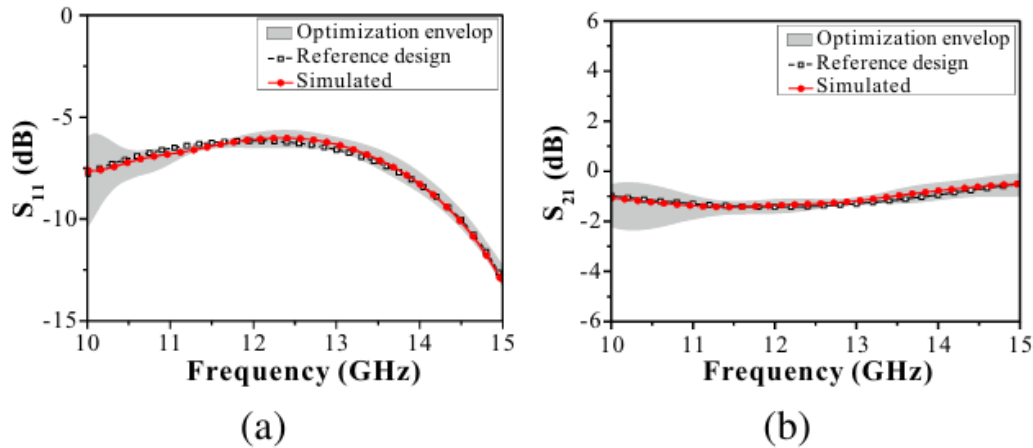


그림 9. TDG 최적화 및 참조면 교정을 적용한 SATCOM 고유의 S_{11} 및 S_{21}

자동화된 TDG 파라미터 최적화와 참조면 교정 이후, 레이돔의 고유 반사 및 투과 특성이 주파수 영역에서 복원되었으며, 이는 그림 9에 제시되어 있다. 제안된 방법의 시뮬레이션 결과는 SATCOM 레이돔의 기준 설계값과 비교하였다. 최적화 과정 전반에 걸쳐 생성된 S-파라미터의 최적화 결과의 최대/최소 범위(Optimization envelop)는 TDG 파라미터 변화가 최종 교정 결과에 미치는 영향을 시각적으로 나타냈다. 제안된 고정형 자유공간 측정 구성으로 시뮬레이션 된 결과를 바탕으로 최종 교정된 레이돔의 S-파라미터는 기준 설계값과 전체 주파수 응답에서 탁월한 일치도를 보였다.

S_{11} 의 경우, 전체 주파수 대역에서 기준 설계와의 RMS 오차가 보정 전 0.367 에서 보정 후 0.009 로 감소하여, 11.1 GHz에서 오차가 ≤ 0.28 dB임을 보여준다. S_{21} 역시 보정 전 0.796 에서 보정 후 0.011 로 줄어들어, 13.7 GHz에서 ≤ 0.18 dB 수준임을 확인하였다. 이 결과는 제안된 자동화 TDG 파라미터 최적화가 고정식 자유 공간 측정에서 높은 정확도를 객관적으로 입증함을 보여준다.

3-B. 실험적 결과

3-A절의 시뮬레이션을 통한 검증에 기반하여, 본 절에서는 실제 환경에서 수행한 측정 결과와 그 정확도 및 재현성을 평가한다. 측정은 10~15 GHz 주파수 대역에서 WR-75 혼 안테나와 이중 코어 15층 SATCOM 레이돔 시편을 사용하여 진행하였으며 그 과정은 그림 10에 제시되어 있다. 이때 100 kHz~40 GHz에서 측정이 가능한 Rohde & Schwarz® VNA의 포트는 3m 길이의 동축 케이블로 연결되었으며, 데이터 취득 전 TOSM 방식으로 교정하였다. 송·수신 안테나를 각각 케이블에 연결한 후, 흡수체 벽이 설치된 측정 챔버 내 지그(jig)에 고정 및 정렬하였다. 흡수체 사용이 교정 결과에 결정적 영향을 미치지 않는으나, 외부 잡음을 억제하고 측정 정확도를 높이기 위해 흡수체 벽을 추가로 설치하였다. 측정 시스템 중앙에는 비금속 재질로 제작된 시편 홀더를 배치하여 불필요한 반사 성분을 최소화하였다. 두 안테나 간 거리는 700mm로, 레이돔 시료의 크기는 400 × 350mm로 이전 시뮬레이션에서 사용한 값과 동일하게 설정하였다. SATCOM 레이돔 시편의 가장자리는 홀더에 맞도록 얇게 가공하였다. 측정 환경 구성 이후, 두 표준 및 SATCOM 레이돔 각각에 대해 S_{11} 과 S_{21} 을 측정하였으며, 측정 과정 전반에 걸쳐 안테나의 정렬 및 거리는 움직이지 않고 일정하게 유지하였다.

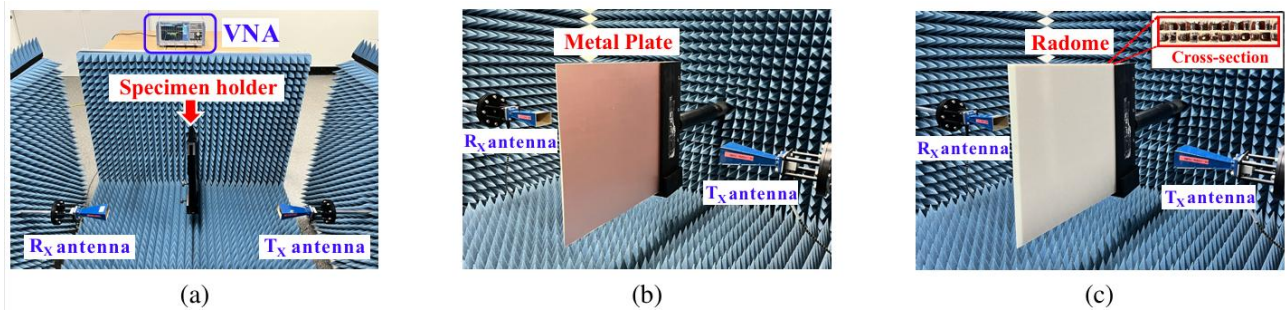


그림 10. 제안하는 고정형 자유공간 측정법의 구현:

(a) 자유공간 표준, (b) 완전 반사 표준, (c) 이중 코어 15층 SATCOM 레이돔

측정된 S-파라미터의 게이팅 윈도우는 자동화된 TDG 파라미터 최적화를 통해 정의하였으며, 그 결과는 표 3에 요약되어 있다. 이후 최종적으로 게이트 및 보정된 SATCOM 레이돔의 고유 S_{11} 과 S_{21} 값은 기준 설계값 및 시뮬레이션 결과와 비교되었고, 그 내용은 그림 11~13에 제시되어 있다.

표 3. 측정 결과에 대해 최적화된 게이팅 윈도우 폭

Standard	Free-Space	Perfect Reflector	Radome
S_{11}	2.489 ns	1.502 ns	2.499 ns
S_{21}	2.500 ns	1.557 ns	2.456 ns

전 주파수 대역에서 반사 계수와 기준 설계값 간의 RMS 오차는 보정 전 0.353에서 보정 후 0.009로 감소하여, 약 97.45%의 오차 저감 효과를 보였다. 투과 계수 역시 RMS 오차가 보정 전 0.793에서 보정 후 0.003으로 줄어들어, 약 99.62%의 오차 저감이 이루어졌다. 설계값과 비교 시, S_{11} 의 최대 오차는 12.7 GHz에서 약 0.40 dB, S_{11} 은 13.7 GHz에서 약 0.20 dB로 나타났다. 또한, 반복된 TDG 파라미터 최적화에서 얻은 샘플 편차(측정 불확도)는 일부 구간 제외 0.2 dB 이하로 유지되어, 과정의 재현성과 안정성을 확인하였다. 측정 주파수 대역 가장자리에서 측정 불확도가 증가한 원인은 주로 저주파 영역에서 에너지 분산에 의해 게이팅 윈도우 경계에서 발생하는 깁스 현상에 기인한 것으로 분석되었다. 이 측정 결과 분석을 통해, 제안된 자동화 TDG 파라미터 최적화 기반 저비용 자유공간 측정 솔루션이 기준 설계에 근접한 충분한 교정 정확도를 갖추고 있으며, 고정식 자유 공간 측정법 또한 실제 실험적 검증에서 높은 정밀도와 재현성을 달성함을 확인하였다.

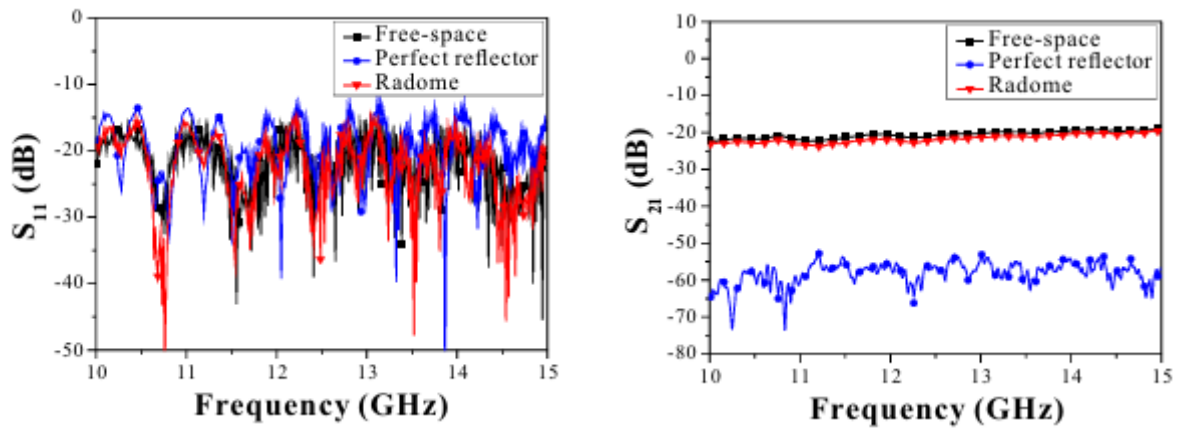
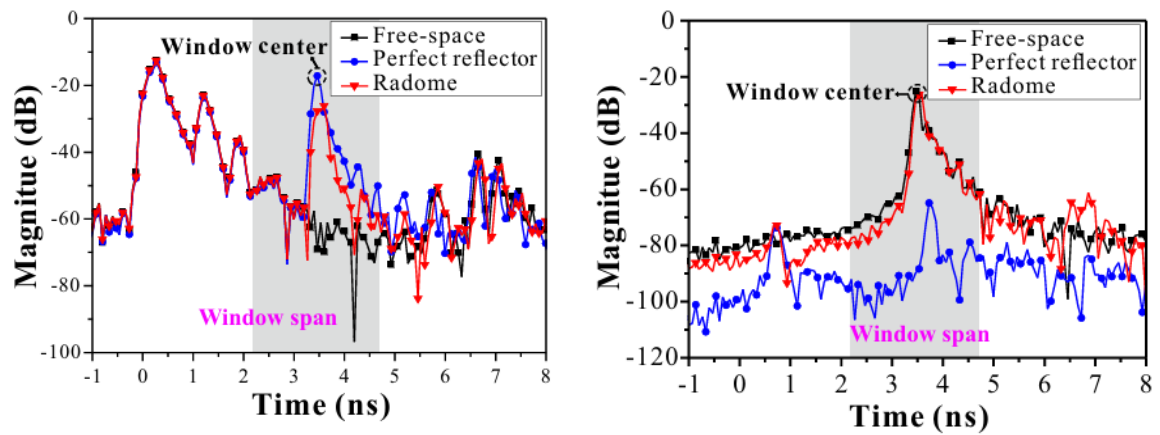
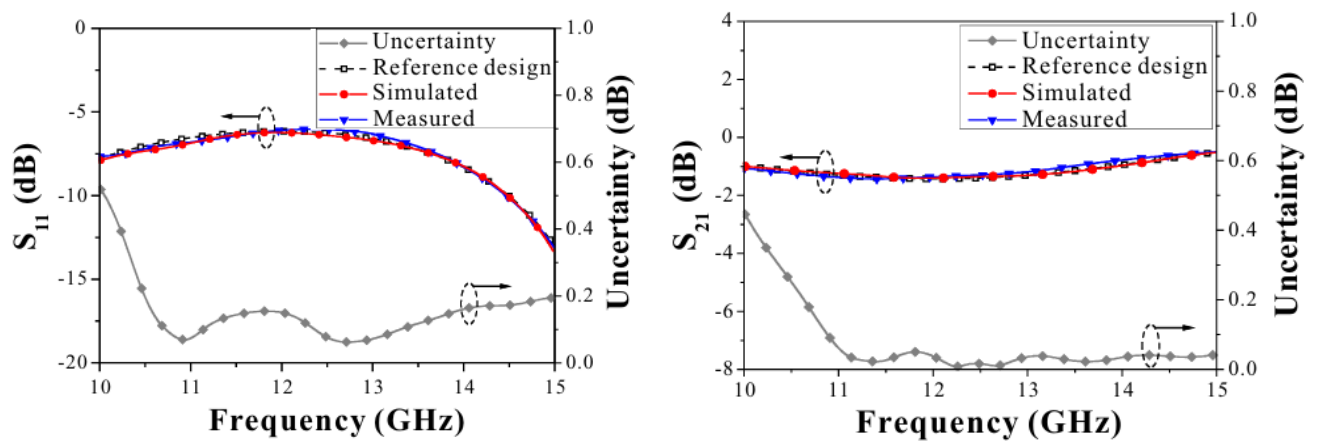
그림 11. 교정 전 주파수 영역의 자유공간에서 S_{11} 과 S_{21} 측정 결과그림 12. 최적화된 TDG 파라미터를 표시한 시간 영역으로 변환된 S_{11} 과 S_{21} 결과그림 13. TDG 최적화 및 참조면 교정을 적용한 SATCOM 고유의 S_{11} 및 S_{21}

표 4. 레이돔 어플리케이션의 기존 연구와의 성능 비교

Ref	Freq (GHz)	MUT	Layers	Thickness (mm)	Meas. Error
[4]	1.5~4.5	Intelligent Radome	6	85.5	≤ 27 dB
[6]	2~8	5A-Sandwich Radome	22	34.8	≤ 3 dB
[7]	1~18	Ultrathin FSS Radome	7	4.5	≤ 26 dB
[8]	5~17	Composite Radome Wall	1	14.7	≤ 16 dB
[35]	5~12	Radome under High Temperature	1	10.8	≤ 1 dB
[36]	76~81	Radome Heating Foil	1	0.375	≤ 1.5 dB
[37]	75~90	Monolithic Radome	1	—	≤ 4 dB
Proposed	10~15	Dual Core SATCOM Radome	15	12.04	≤ 0.40 dB

표 4에 제시된 자유공간에서 측정한 레이돔 응용 분야별 측정 오차 비교 분석에 따르면, 제안된 방법은 기존 연구에 비해 주파수 대역, 측정 방법, 시험 재료(Material Under Test, MUT)의 다양성에도 불구하고 전반적으로 우수한 오차 결과를 나타냈다. 비교 연구 간의 이질성을 고려하여, 절대값 기반 S-파라미터 측정 그래프와 방법론적 차이 요소에 초점을 맞춰 분석을 수행하였다.

첫째, 측정 정확도 측면에서, 기존 자유 공간 측정법은 1~27 dB 범위의 오차 수준을 보고한 바 있으나, 본 연구에서 제안한 고정식 자유 공간 측정법은 오차를 ≤ 0.40 dB 이하로 대폭 줄였다. 또한 주파수 의존성을 고려하면, 본 논문에서 제안하는 방법은 유사 주파수 대역(5~17 GHz)에서 수행된 기존 연구⁽⁸⁾에 비해 우수한 경쟁력을 유지하거나, 밀리미터파 대역(75~90GHz)에서 보고된 1.5~4 dB 수준의 오차⁽³⁷⁾와 비교해도 중심 주파수로 정규화 할 경우 탁월한 성능을 보였다.

둘째, 다층 시편의 적응성 측면에서, 본 측정 솔루션은 15층 이중 코어 SATCOM 레이돔에 대해 높은 정확도를 유지함으로써, 층 수가 증가함에 따라 흔히 발생하는 오차 증가 문제를 극복하였다. 22층 레이돔을 다룬 기존 연구에서는 ≤ 3 dB의 오차가 보고된 바⁽⁶⁾ 있는데, 본 방법은 해당 연구보다 약 2.6 dB의 오차 저감 효과를 달성하였다. 또한 두꺼운 허니콤 코어나 복잡한 내부 구조에 의한 내부 반사 등에도 높은 정확도를 유지하여, 솔루션의 견고함을 입증하였다.

셋째, 시스템 복잡도 측면에서, 제안된 측정 솔루션은 TRL 및 TRM 교정 방식에서 요구되는 정밀 이동 스테이지와 대형 흡수체의 필요성을 제거함으로써 방법론적 혁신을 달성하였다. 그 결과, 시스템 구성 및 측정 시간, 비용을 크게 단축할 수 있으며, 측정 불확도 분석을 통해 재현성도 유지됨이 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 항공우주용 레이돔의 전자기 특성 분석을 위한 자동화된 TDG 파라미터 최적화 기반의 고정형 자유 공간 측정법을 기반으로 한 저비용 측정 솔루션을 제안하였다. 제안된 방법은 측정 장치의 재배포 없이 수식적으로 참조면을 이동시키고, TDG 윈도우 파라미터를 자동 탐색하여 다중 반사·잡음을 체계적으로 억제함으로써 정확도·재현도·운영비용을 동시에 개선한다. 이중 허니콤 코어 15층 SATCOM 레이돔을 이용한 실험적 검증 결과, 반사 및 투과 계수의 오차는 각각 $S_{11} \leq 0.40$ dB, $S_{11} \leq 0.20$ dB로 높은 측정 정밀도를 확인하였다. 또한, 기준 설계 값과의 RMS 오차는 보정 이전 대비 최대 99.62%까지 감소시켰다.

본 솔루션의 산업적 의의는 다음과 같다. 첫째, 안테나 간격의 조정을 위한 정밀 이동장치, 고성능의 흡수체 교체가 필요한 TRL, TRM 교정 방법 대비 장치 이동이 없는 고정형 측정 절차로 환경 세팅과 측정 시간을 단축하고 인력·부자재 비용을 절감한다. 둘째, 상용 TDG 소프트웨어의 의존 없이 Python 기반 구현으로 운용할 수 있어 수출통제(EL) 및 라이선스 비용 이슈를 회피한다. 셋째, 레이돔의 층수·코어 유형이 달라도 동일 절차로 적용 가능해 생산·검사·정비(MRO) 라인의 수율 관리·수입검사·정기 열화 모니터링, 레이돔 헬스 케어 등으로 바로 적용·확장할 수 있다. 한계 및 향후

연구로는 입사각·편파 스캔 시의 보정 일반화, 곡률이 큰 대형 레이돔의 거리/개구 보정 정밀화, mmWave 대역 확장과 온도·습도 변화에 대한 강건성 평가, 상용 플랫폼 연계를 위한 시험 자동화 및 실시간 품질지표 대시보드 구현 등이 있다. 이러한 후속 연구를 통해 제안하는 통합 솔루션은 항공·우주·방산 플랫폼의 저비용·고재현성 레이돔 특성화 표준 절차로 자리매김할 수 있다.

참고문헌

- [1] D. J. Kozakoff, Analysis of radome-enclosed antennas, Artech House, 2010.
- [2] C. J. Hodgkinson, D. E. Anagnostou, and S. K. Podilchak, "Phase gradient metasurface radome offering beam angle translation and wideband absorption," IEEE Antennas Propag. Lett., vol. 23, no. 10, pp. 2974-2978, Oct. 2024.
- [3] Z. Xing, F. Pang, P. Yang, and J. Yang, "A low-RCS and wideband circularly polarized array antenna co-designed with a high-performance AMC-FSS radome," IEEE Antennas Propag. Lett., vol. 21, no. 8, pp. 1659-1663, Aug. 2023.
- [4] J. Yuan et al., "Intelligent radome design with multilayer composites to realize asymmetric transmission of electromagnetic waves and energy isolation," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 19, no. 9, pp. 1511-1515, Sep. 2020.
- [5] S. Hong, S. Nam, S. Choi, J. Joo, and J. Han, "Advanced beam estimation for antennas via patterned coupling-line detection board in Ka-band," J. Electromagn. Eng. Sci., vol. 24, no. 5, pp. 524-529, May 2024.
- [6] Z. Qamar, J. L. Salazar-Cerreno, and N. Aboserwal, "An ultra-wide-band radome for high-performance and dual-polarized radar and communication systems," IEEE Access, vol. 8, pp. 199 369-199 381, Nov. 2020.
- [7] B. Yi, L. Yang, and P. Liu, "Design of miniaturized and ultrathin absorptive/transmissive radome based on interdigitated square loops," Prog. Electromagn. Res. Lett., vol. 62, pp. 117-123, 2016.
- [8] N. Liu, X. Sheng, C. Zhang, and D. Guo, "Design of dual-band composite radome wall with high angular stability using frequency selective surface," IEEE Access. Lett., vol. 7, pp. 123 393 -123 401, Sep. 2019.
- [9] J.-S. Kang, "Free-space unknown thru measurement using planar offset short for material characterization," J. Electromagn. Eng. Sci., vol. 22, no. 5, pp. 555-562, Sep. 2022.
- [10] J.-S. Kang, Y. S. Lee, and Y. Park, "Free-space dielectric property measurement of biological tissues at W-band frequencies," J. Electromagn. Eng. Sci., vol. 25, no. 2, pp. 109-117, Mar. 2025.
- [11] T. Meng, W. Wu, and N. Yuan, "The design and analysis of invisible radome with sandwich-like properties," Radioengineering, vol. 26, no. 2, pp. 423-429, Jun. 2017.
- [12] W. Y. Yong, A. Hadaddi, and A. A. Glazunov, "Design and characterization of the fully metallic gap waveguide-based frequency selective radome for millimeter-wave fixed-beam array antenna," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 71, no. 1, pp. 531-541, Jan. 2022.
- [13] A. A. Omar and Z. Shen, "Thin 3-D bandpass frequency-selective structure based on folded substrate for conformal radome applications," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 67, no. 1, pp. 282-290, Jan. 2018.
- [14] K.-C. Yaw, "Measurement of dielectric material properties," Application Note, Rohde & Schwarz, pp. 1-35, 2012.
- [15] T. Dahms et al., "Measurement of dielectric properties of thin materials for radomes using

- waveguide cavities,” *Telecom*, vol. 5, no. 3, pp. 706–722, Aug. 2024.
- [16] A. K. Sharma and S. K. Dubey, “Dielectric characterization for solids with an improved NRW procedure and uncertainty estimation,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, pp. 1–11, Oct. 2023.
 - [17] P. L’opez–Rodríguez et al., “Comparison of metal–backed free–space and open–ended coaxial probe techniques for the dielectric characterization of aeronautical composites,” *Sensors*, vol. 16, no. 7, Art. no. 967, Jun. 2016.
 - [18] R. A. Fenner, E. J. Rothwell, and L. L. Frasc, “A comprehensive analysis of free–space and guided–wave techniques for extracting the permeability and permittivity of materials using reflection–only measurements,” *Radio Sci.*, vol. 47, no. 1, pp. 1–13, Jan. 2012.
 - [19] H. Ahmed, J. Hyun, and J.–R. Lee, “Development of scanning single–port free–space measurement setup for imaging reflection loss of microwave absorbing materials,” *Measurement*, vol. 125, pp. 114–122, Apr. 2018.
 - [20] F. Nazari, M. Taherkhani, M. Mokhtari, H. Aliakbarian, and O. Shekoofa, “Efficient design methodology for sandwich radome panels: a C–band design example,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 14, no. 7, pp. 808–816, Jul. 2020.
 - [21] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, “A free–space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 38, no. 3, pp. 789–793, Jun. 1989.
 - [22] D. Bourreau, A. Peden, and S. Le Maguer, “A quasi–optical free–space measurement setup without time–domain gating for material characterization in the W–band,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 55, no. 6, pp. 2022–2028, Dec. 2006.
 - [23] N. Gagnon, J. Shaker, L. Roy, and P. Berini, “Low–cost free–space measurement of dielectric constant at Ka–band,” *IET Microw., Antennas Propag.*, vol. 151, no. 3, pp. 271–276, Jun. 2004.
 - [24] D. R. Lima et al., “Accuracy of GRL calibration considering time domain gating for the calculation of permittivity parameter in free space technique,” in *Proc. SBMO/IEEE MTT–S Int. Microw. Optoelectron. Conf.*, Porto Alegre, Brazil, 2015, pp. 1–5.
 - [25] N. Shen and B. Wei, “Time–domain reflection of pulse plane wave from multilayered lossy medium,” *IEEE Antennas Propag. Lett.*, vol. 20, no. 4, pp. 557–561, Apr. 2021.
 - [26] L.–F. Chen, C. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, *Microwave Electronics: Measurement and Materials Characterization*. Hoboken, NJ, USA, Wiley, 2004.
 - [27] Y. Zhou, D. Zhang, X. Xu, and J. Li, “Influence of antenna half–power beam width on equipment under test volume in radiation disturbance measurement,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2108, no. 1, Art. no. 012078, 2021.
 - [28] B. Archambeault, S. Connor, and J. C. Diepenbrock, “Time domain gating of frequency domain S–parameter data to remove connector end effects for PCB and cable applications,” in *Proc. IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, Portland, OR, USA, 2006, vol. 1, pp. 199–202.
 - [29] F. J. F. Gonçalves, A. G. M. Pinto, R. C. Mesquita, E. J. Silva, and A. Brancaccio, “Free–space materials characterization by reflection and transmission measurements using frequency–by–frequency and multi frequency algorithms,” *Electronics*, vol. 7, no. 10, Art. no. 260, Oct. 2018.
 - [30] A. Arsenovic et al., “scikit–rf: An open–source Python package for microwave network creation, analysis, and calibration [speaker’s corner],” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 23, no. 1, pp. 98–105, Jan. 2021.
 - [31] A. V. Oppenheim, *Discrete–Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA, Pearson, 1999.

- [32] Z. Chen and D. N. Lewis, "Delving into time domain gating: An extensive study on parameter selection and its implications," in Proc. 18th Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP), Glasgow, U.K., 2024, pp. 1–5.
- [33] FRAZIER, Peter I. A tutorial on Bayesian optimization. arXiv preprint arXiv:1807.02811, Jul. 2018.
- [34] T. Savage and E. A. del Rio Chanona, "Human–algorithm collaborative Bayesian optimization for engineering systems," Comput. Chem. Eng., vol. 189, Art. no. 108810, Apr. 2024.
- [35] L. Yang et al., "Electromagnetic design method of radomes under high temperature environment," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 73, no. 5, pp. 3047–3059, May. 2025.
- [36] H. Dominic, M. Kromer, R. Echle, and M. Harter, "Evaluation of design considerations for radome heating foils in automotive radars," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 72, no. 10, pp. 7941–7950, Oct. 2024.
- [37] J. L. Salazar–Cerreño, Z. Qamar, and N. Aboserwal, "A multipurpose and reconfigurable mm–wave scanner system for accurate measurements of passive/active antenna array, array calibration, radome and material characterization," in Proc. IEEE Conf. Antenna Meas. Appl. (CAMA), Nice, France, 2021, pp. 555–559.