

근전계 RCS 측정 오차 요인 및 불확도 분석

서민경^{*1)} · 태현성¹⁾ · 김정규¹⁾ · 박호민¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 항공기술연구원

An Analysis of Error Components and Uncertainties in Near-field RCS Measurement

Mingyeong Seo^{*1)} · Hyunsung Tae¹⁾ · Jeongkyu Kim¹⁾ · Homin Park¹⁾

¹⁾ *Aerospace Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 18 March 2020 / Revised 3 July 2020 / Accepted 24 July 2020)

Abstract

Nowadays, it is required to apply low observable technology to weapon systems in operation or under development. Radar Cross Section(RCS) is a measure of the scattered power in a given direction when a target is illuminated by an incident wave and used as a parameter to estimate the low observable performance of weapon system. RCS of a target can be calculated by various numerical methods. However, measurement is also needed to estimate RCS of a complex target because it is difficult to estimate theoretically. To acquire reliable measurement results, an analysis of measurement uncertainty is essential. In this paper, error components and uncertainties of near-field RCS measurement system which was constructed in ASTEC(Aerospace System Test & Evaluation Center) were analyzed based on the IEEE recommended practice for radar cross-section test procedures(IEEE Std. 1502-2007) which describes the uncertainty of RCS measurement and unique error components of this near-field measurement system were also identified.

Key Words : Radar Cross Section(레이더 단면적), Error Component(오차 요인), Uncertainty(불확도),
Near-field Measurement(근전계 측정)

1. 서론

현대전에서 스텔스 기술은 무기체계의 생존성과 직결되는 요소가 되었다. 무기체계의 생존 가능성 확보

및 효율적인 임무 수행을 위해 현재 운용 또는 개발 중인 무기체계에 저피탐 성능이 요구되고 있으며, 이를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 스텔스 기술은 상대방의 레이더 등에 의해 탐지되지 않도록 무기체계의 형상 신호를 감소시키거나 제거하는 기술을 통칭하며, 이 중 레이더에 의한 피탐지 성능을 나타내는 지표로 레이더 단면적(RCS, Radar Cross Section)이

^{*} Corresponding author, E-mail: mkseo707@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

활용된다. RCS는 표적에서 반사되어온 전력과 동일한 전력을 반사할 수 있는 가상의 면적으로, 피탐지 확률을 낮추기 위해 형상 설계뿐만 아니라, 전자파 흡수 구조(RAS, Radar Absorbing Structure)를 적용하는 등 RCS 감소를 위한 다양한 연구 및 기술의 적용이 진행되고 있다^[1].

무기체계의 RCS 특성을 분석하기 위한 방법에는 해석과 측정이 있다. RCS 해석은 다양한 전자파 수치 해석 기법을 기반으로 하며, CAD(Computer Aided Design) 모델과 물질 정보 등을 활용하여 다양한 조건에서의 RCS 특성을 분석할 수 있다. 하지만 해석 기법 간 정확도의 차이로 인해 해석하고자 하는 체계의 특성에 따른 적절한 기법의 선택이 필요하고, 크고 복잡한 무기체계의 경우 긴 해석 시간 소요, 컴퓨터 메모리 용량 부족 등의 문제가 발생할 수 있다. 또한 복잡한 구조에 대해서는 정확한 예측이 어려우며, 측정 등을 통해 해석 결과를 검증할 필요가 있다^[2-4].

RCS 측정의 경우 피시험체의 제작이 필요하지만, 해석 대비 비교적 짧은 시간에 다양한 주파수에 대한 RCS 특성 데이터를 획득할 수 있다. 측정 시설은 레이더와 피시험체 간 거리에 따라 원전계 측정 시설, 컴팩테인지 시설, 근전계 측정 시설로 구분할 수 있으며, 원전계 측정 시설은 레이더와 피시험체 간 거리가 식 (1)의 원전계 조건을 만족하는 시설을 의미한다. 식 (1)에서 R 은 레이더와 피시험체 간 최소 거리, D 는 안테나 및 피시험체의 최대 크기, λ 는 파장이다^[5].

$$R = 2D^2 / \lambda \quad (1)$$

원전계 측정 시설은 대형 피시험체의 측정이 가능하나, 매우 넓은 부지가 필요하기 때문에 야외 시설이 대부분이다. 이러한 야외 시설은 보안 유지가 어렵고 기후, 주변 환경 등의 영향을 받기 때문에 시험장 운영에 제약사항이 많다. 컴팩테인지 시설은 이러한 원전계 측정 시설의 단점을 보완한 시설로 반사판을 활용하여 시험영역에 평면파가 도달하도록 설계한다. 컴팩테인지에서 반사판은 시설의 성능과 직결되는 요소이며, 모서리 부분 및 표면에 정밀한 설계 및 가공이 요구된다^[5-7]. 대형 반사판의 제작은 기술적으로 어렵고 고비용이 소요되어 컴팩테인지에서 측정 가능한 피시험체의 크기가 제한적일 것으로 예상할 수 있다. 따라서 항공기 등의 대형 표적을 측정한다고 했을 때 시설구축 비용이나 사용 부지 면적 등을 고려하면 근

전계 RCS 측정이 불가피하다.

항공기술연구원 항공시험장에서는 이러한 여건을 고려하여 Fig. 1과 같은 실내 근전계 RCS 측정 시설을 구축하였다. 본 측정 시설은 항공/유도무기체계의 RCS를 측정할 수 있는 모노스태틱 RCS 측정 시설로, 크게 레이더 시스템, 파일런, 스캐너로 구성되며, 주로 2D ISAR(Inverse Synthetic Aperture Radar) 측정 및 3D 측정을 통해 원시 데이터(raw data)를 획득한다. 2D ISAR 측정은 안테나를 피시험체와 동일한 높이로 고정하고 피시험체를 방위각 방향으로 움직이면서 측정하는 방식이며, 획득한 데이터를 레이더 이미지로 변환하면 피시험체를 위에서 바라본 것 같은 평면 이미지를 얻는다. 이에 반해 3D 측정은 안테나를 수직 방향으로 움직이면서 각각의 안테나 높이마다 2D ISAR 측정을 수행하여 3D 데이터를 획득하며, 2D ISAR 측정을 여러 번 수행하기 때문에 측정 시간은 길어지지만, 입체 데이터를 얻을 수 있기 때문에 2D ISAR 측정에 비해 지면반사, 배경잡음 및 타겟 지지대 등 클러터 신호 제거가 용이하다. 이렇게 획득한 원시 데이터는 Fig. 2와 같이 레이더 이미지로 변환 후, 크기/위상 보상 및 안테나 패턴 보정 등의 데이터 후처리를 통해 최종 레이더 이미지를 얻으며, 이 최종 레이더 이미지를 활용하여 원전계 RCS를 추출한다.

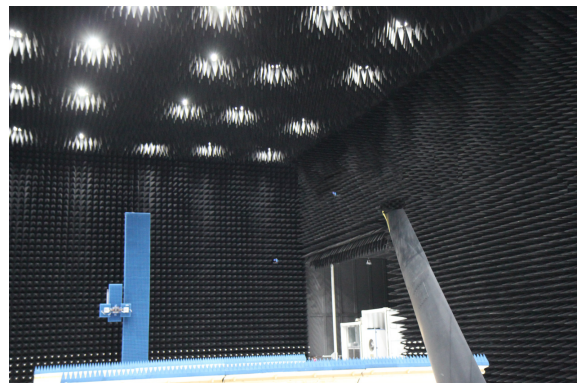


Fig. 1. Near-field RCS measurement facility in ADD

신뢰할 수 있는 측정 결과를 얻기 위해서는 측정 오차 분석이 필수적이며, 본 논문에서는 측정 주파수를 10 GHz로 가정하고 항공시험장에 구축된 실내 근전계 RCS 측정 시스템의 2D ISAR 및 3D 측정의 오차 요인 및 불확도를 분석하였다. 일반적으로 RCS 측정 시 발생할 수 있는 오차 요인을 제시하고 있는

IEEE recommended practice for radar cross section test procedure(IEEE Std. 1502-2007)를 참조하여 분석하였으며⁹⁾, 문서에 제시된 요인 외에 본 측정 시스템의 특성에 따른 고유한 오차 요인을 식별하였다.

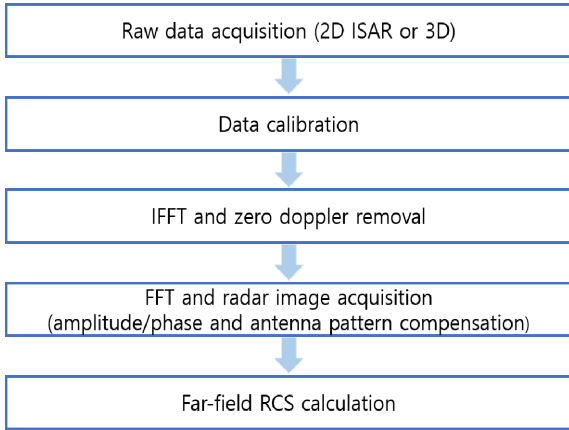


Fig. 2. Data processing procedure

2. RCS 측정 오차의 계산

측정은 어떤 양에 대하여 합리적으로 여겨지는 하나 또는 그 이상의 값을 실험적으로 얻는 과정을 의미하며, 측정 결과는 일반적으로 하나의 측정값과 측정불확도로 표현된다⁸⁾. 이는 피시형체의 RCS를 측정하는 경우에도 적용할 수 있으며, RCS 측정값을 σ_0 , 불확도를 $\Delta\sigma$ 라고 할 때, RCS 측정 결과는 식 (2)와 같으며, 불확도를 dB로 표현하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^{9,10)}.

$$\sigma = \sigma_0 \pm \Delta\sigma \tag{2}$$

$$\Delta\sigma_{\pm}(dB) = 10\log_{10}\left(1 \pm \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}\right) \tag{3}$$

RCS 측정 오차를 발생시키는 요인으로는 측정환경 내 잡음 신호 레벨, 교정 표적의 RCS, 시스템 안정성, 피시형체의 정렬 상태 등 매우 다양한 요소들이 있다. 이러한 각 불확도 요소를 $\Delta\sigma_i$ 라 했을 때, 전체 불확도 $\Delta\sigma$ 는 식 (4)와 같이 RSS(Root Sum of Square)로 추정할 수 있다^{9,10)}.

$$\left(\frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}\right)^2 = \sum_i \left(\frac{\Delta\sigma_i}{\sigma_0}\right)^2 \tag{4}$$

3. RCS 측정 오차 요인 및 불확도 분석

3.1 측정환경 내 배경잡음 신호

피시형체의 유무와 상관없이 수신되는 배경잡음 신호의 레벨 확인을 위해서는 피시형체 측정과 동일한 환경이지만 피시형체는 설치하지 않은 상태에서의 측정이 필요하다. 식 (5)로 배경잡음 신호에 따른 오차를 분석할 수 있으며, ϵ_n 은 식 (6)과 같이 신호 S 대 배경잡음 N 의 비로 계산할 수 있다⁹⁾.

$$\Delta\sigma' = -20\log_{10}(1 - 10^{-\epsilon_n/20}) \tag{5}$$

$$\epsilon_n = 20\log_{10}|S/N| \tag{6}$$

본 측정 시설의 배경잡음 신호 레벨을 확인하기 위해 피시형체가 설치되지 않은 상태에서 2D ISAR 측정을 수행하였다. 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었으며, 배경잡음 신호의 크기는 -34.18 dBsm이다.

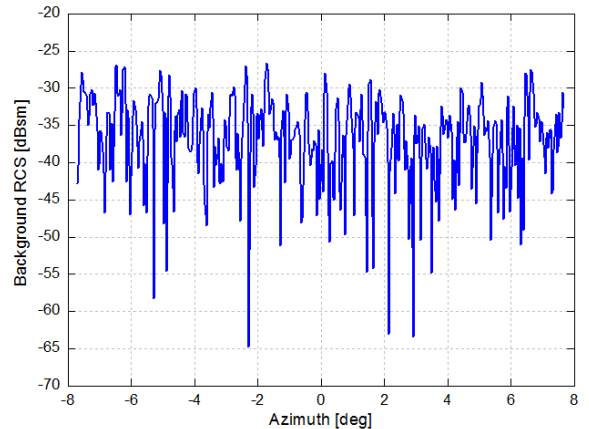


Fig. 3. The measured data of background

3D 측정의 경우에는 배경잡음 신호가 챔버 내에 균일하게 분포되어 있다고 가정하여 추정할 수 있고, 결국 3차원 레이더 이미지를 통해 피시형체 영역을 제외한 클러터 신호의 제거가 가능하기 때문에 2D ISAR 측정 보다 배경잡음 신호의 크기는 감소한다. 피시형

체의 높이는 1 m, 지면으로부터 피시험체가 설치된 지점까지의 높이는 3.5 m, 수직 방향의 cross-range extension은 14 m, 잡음 신호는 전 체적에 대해 고르게 분포하고 있다고 가정하였다. 피시험체 부분을 제외한 나머지 영역의 신호를 제거한다고 가정하면, 3D 측정에서 배경잡음 신호 레벨은 2D ISAR 측정에서의 1/14로 추정할 수 있고, 이에 따라 3D 측정에서의 배경잡음 신호 레벨은 -45.64 dBsm으로 추정할 수 있다. -20 dBsm의 피시험체 측정을 가정할 때 배경잡음 신호에 의한 오차는 식 (5)에 따라 2D ISAR 측정에서 1.89 dB, 3D 측정에서 0.47 dB이다.

3.2 교정 표적의 RCS

일반적으로 교정 표적으로는 구나 평판, 원통형 등 이론적인 RCS 계산이 가능한 형태가 사용되며, 제작 과정에서의 물리적 오차나 측정 과정에서 교정 표적의 정렬 상태 등이 오차의 원인이 된다^[9].

본 측정 시설에서는 교정 데이터의 획득 및 검증을 위해 서로 다른 2개 이상의 교정 표적을 측정하며, 교정 표적의 RCS에 의한 오차를 분석하기 위해 크기가 다른 2종의 원통형 교정 표적을 활용하였다. 반지름 10 cm, 높이 30 cm의 원통형 교정 표적의 측정을 통해 교정 데이터를 얻었고, 반지름 20 cm, 높이 50 cm의 원통형 교정 표적의 RCS를 측정하여 교정 데이터가 적용된 측정값과 수식을 통해 구한 이론값의 비교를 통해 오차를 분석하였다. Fig. 4는 주파수 9 ~ 11 GHz에 대해 큰 원통형 교정 표적의 RCS 측정값을 나타낸 것으로, 10 GHz에서 RCS는 9.92 dBsm이다. RCS 이론값은 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있으며, a 와 b 는 원통형 교정 표적의 반지름 및 높이이고, λ 는 파장이다^[11]. 큰 원통형 교정 표적의 RCS 이론값은 10.2 dBsm이며, 9.92 dBsm의 측정값과 비교할 때 약 0.28 dB의 오차를 갖는다.

$$\sigma = \frac{2\pi ab^2}{\lambda} \quad (7)$$

3.3 레이더/안테나 특성 관련 요인

본 측정 시스템의 주요 구성 요소 중 하나인 레이더 시스템은 VNA(Vector Network Analyzer)를 비롯하여 증폭기, 안테나 등으로 구성된다. 주기적인 VNA 교정뿐만 아니라 시스템 내부 RF 루프에 대해서 매 측정 전 교정을 수행하지만, 안테나 또는 레이더 시스템

의 특성에서 비롯된 오차가 존재하며, 본 절에서는 이러한 오차 요인에 대해 분석하였다.

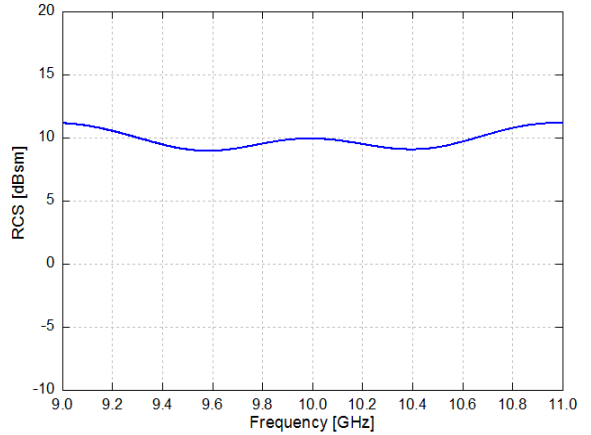


Fig. 4. The measured data of cylinder (radius: 20 cm, height: 50 cm)

3.3.1 Average illumination

Average illumination은 송신파가 피시험체의 전체 체적에 고르게 조사되지 못했을 경우 발생하는 오차이다. 일반적으로 안테나 패턴 특성의 영향을 받으며, 빔폭이 넓은 안테나를 사용하거나 각도에 따라 안테나 이득을 보정하는 방식으로 오차를 줄일 수 있다. 안테나 패턴에 의한 오차는 식 (8)을 이용하여 계산할 수 있으며, 이 때 θ 는 최대 오차 각도, θ_0 는 안테나의 반전력빔폭(HPBW, Half Power Beam Width)의 1/2이다^[9].

$$\Delta\sigma' = -40\log_{10}\left[\cos\left(\frac{\pi\theta}{4\theta_0}\right)\right] \quad (8)$$

Fig. 5는 측정에 사용되는 안테나의 패턴을 나타낸 것으로, 안테나의 HPBW는 방위각 방향으로 53°, 고각 방향으로 51°이다. 본 측정 시설에서 안테나와 피시험체 간 거리가 27 m임을 고려하면 안테나는 충분히 넓은 빔폭을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 이와 더불어 본 측정 시스템에서는 데이터 후처리 시 안테나 패턴을 이용하여 이득을 보정하는데, 이 때 방위각 방향으로만 보정을 수행하여 고각 방향에 대한 오차를 식 (8)을 이용하여 계산하였다. 피시험체의 높이를 1 m로 가정했을 때 안테나와 피시험체 간 거리를 고려하면 θ 는 약 2.1°이며, 고각 방향에서 안테나 패턴에

의한 오차는 1.1×10^{-5} dB로, 무시할 수 있는 작은 수치이다.

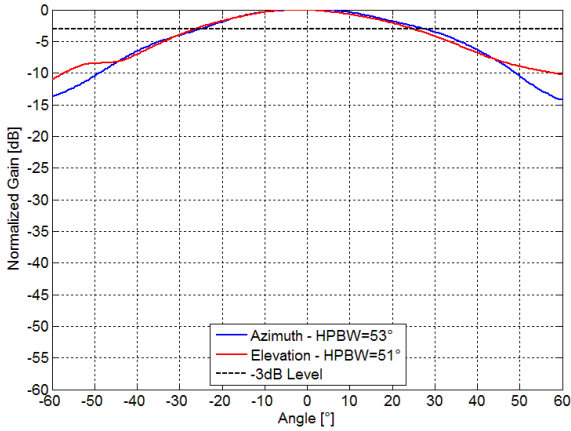


Fig. 5. Normalized pattern of the measurement antenna(10 GHz)

3.3.2 교차 편파

교차 편파에 의한 오차는 안테나의 정렬, 안테나 자체의 물리적인 오차, 안테나와 피시험체의 편파 격리도 등에 의해 발생한다. 안테나의 편파 격리도를 ϵ_p dB라고 할 때, 교차 편파에 의한 오차는 식 (9)로 계산할 수 있다⁹⁾.

$$\Delta\sigma' = -20\log_{10}(1 - 10^{-\epsilon_p/10}) \quad (9)$$

측정에 사용되는 안테나는 약 23 dB의 편파 격리도를 갖으며, 식 (9)에 의해 교차 편파에 의한 오차는 0.04 dB로 추정할 수 있다.

3.3.3 드리프트

이 오차 요인은 측정 시간이 길어짐에 따른 레이더의 성능 변화에 기인한다⁹⁾. 이를 확인하기 위해 송수신기를 페루프로 구성하여 2시간 동안 레이더 시스템의 성능 변화를 확인하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 10 GHz에서는 0.06 dB 이내의 전달 특성 변화를 갖음을 확인하였다.

3.3.4 비선형성

본 측정 시스템 수신단의 선형성을 확인하기 위해 VNA 출력을 증가시키며 송신 안테나 앞단에서의 전

력을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 시스템 특성을 고려하여 수신단의 LNA(Low Noise Amplifier)에 입력될 것으로 예상되는 -93 dBm부터 -31 dBm 범위에 대해 분석하였으며, 오차는 0.1 dB 이내로 불확도 분석 시 0.1 dB를 적용하였다.

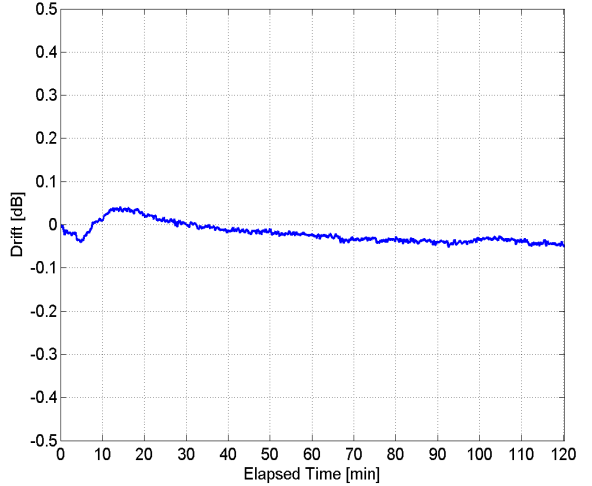


Fig. 6. The measured data of drift(10 GHz)

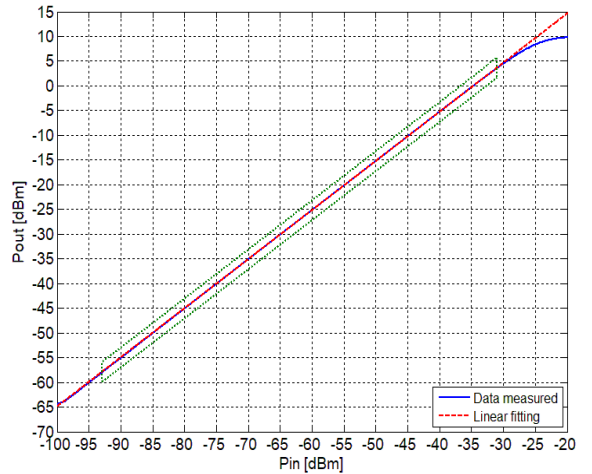


Fig. 7. Receiver linearity at 10 GHz

3.3.5 주파수

주파수에 의한 오차는 식 (10)으로 계산할 수 있으며, 일반적으로 무시할 수 있는 요소이다⁹⁾. 식 (10)에서 f 는 주파수, Δf 는 시스템의 유효 대역폭이며, 측정 시 10 kHz의 IFBW를 사용한다고 가정했을 때 주

과수에 의한 오차는 8.7×10^{-6} dB로 무시할 수 있는 수치이다.

$$\Delta\sigma' = -20\log_{10}\left(1 - \frac{\Delta f}{f}\right) \quad (10)$$

3.4 피시험체 설치 관련 요인

3.4.1 정렬 상태 및 거리

측정 과장 대비 큰 표적을 측정할 때 표적의 위치나 방향의 미세한 차이는 오차를 야기할 수 있다⁹⁾. 본 측정 시설에서는 표적의 방향에 따른 오차를 최소화하기 위해 피시험체를 설치한 후 각도계, 레이저 등을 활용하여 수평, 수직 방향의 정렬 상태를 확인하고 있다. 이와 더불어 동적 측정 시설이거나 바람 등의 영향을 받는 야외 시험시설에서는 피시험체의 움직임에 따른 오차가 발생할 수 있으나, 본 측정 시설이 정적 측정 시설이고, 2D ISAR 등의 측정 시 피시험체를 매우 느린 속도로 움직이는 점을 고려하면 피시험체의 정렬 상태에 의한 오차는 무시할 수 있는 요인으로 판단할 수 있다.

또한 레이더 안테나로부터 피시험체까지의 거리를 R 이라고 할 때 거리에 의한 오차는 식 (11)로 계산할 수 있으나⁹⁾, 본 시설이 정적 측정 시설임을 고려하여 무시할 수 있는 요인으로 판단하였다.

$$\Delta\sigma' = -40\log_{10}\left(1 - \frac{\Delta R}{R}\right) \quad (11)$$

3.4.2 측정 환경 및 피시험체 간 상호작용

피시험체로부터 산란된 성분이 피시험체 지지대나 챔버 벽면 등 측정 환경에 의해 재산란되는 경우 오차가 발생할 수 있다⁹⁾.

본 측정 시설은 벽면에 전자파 흡수재가 부착되어 있고, 피시험체 지지대로 -40 dBsm(X band) 수준의 파일런을 사용한다. 이를 고려하면 피시험체와의 상호작용에 의한 오차를 발생시키는 부분은 파일런과 피시험체 간 체결부로 판단할 수 있다. 측정 시 체결부의 노출에 따른 다중반사를 최소화하기 위해 20 dB의 감쇄성능을 갖는 전자파 흡수재를 활용하여 체결부의 노출을 최소화하고 있으며, 데이터 후처리 시 레이더 이미지 상에서 체결부에 해당하는 영역은 제거한 후 원전계 RCS를 추출한다. 이에 따라 측정 환경 및 피시험체 간 상호작용에 의한 오차는 무시할 수 있는 요인으로 판단할 수 있다.

3.5 시스템 고유의 오차 요인

IEEE Std. 1502-2007 문서에 RCS 측정 오차 요인으로 제시되지 않았지만 측정 환경 및 데이터 후처리 방식에 의해 본 측정 시스템만이 고유하게 가지고 있는 2가지의 오차 요인을 식별하고 이를 분석하였다.

3.5.1 거리 보정에 따른 오차

본 측정 시스템은 측정을 통해 레이더 이미지를 획득한 후 이를 활용하여 원전계 RCS 데이터를 도출한다. 항공기 엔진 덕트와 같이 다중 반사가 많이 발생하는 구조를 포함한 피시험체의 측정 시 레이더 이미지 상에는 실제 산란 지점이 아닌 다른 지점에 신호가 나타날 수 있다. 이를 보정하기 위해 본 측정 시스템에서는 데이터 후처리 시 레이더 이미지 상에서 해당 영역의 신호를 선택하여 거리에 대한 보상을 수행한다. 이 때 해당 영역이 피시험체의 또 다른 명확한 산란 지점과 겹치거나 근접한 경우 거리 보정이 어려우며 이에 따른 오차가 발생할 수 있다. 이 오차 요인은 피시험체의 특성에 따라 평가되어야 하며, 본 오차 분석에서는 거리 오차를 1 m로 가정하였다. 레이더와 피시험체 간 거리는 27 m이며, 식 (11)을 이용하면 오차는 약 0.66 dB로 추정할 수 있다.

3.5.2 Radar fence tip diffraction

본 측정 시설에서는 지면 반사의 영향을 최소화하기 위해 안테나와 피시험체 사이에 Fig. 8과 같은 레이더 펜스를 설치한다. 레이더 펜스의 사용으로 지면으로부터의 반사는 줄일 수 있지만 펜스 상단 팁 부분에 의한 회절 성분이 측정 오차의 요인이 되며, 수직 방향으로도 데이터를 얻는 3D 측정과 달리 2D ISAR 측정에 대해서는 오차가 반영되어야 한다.

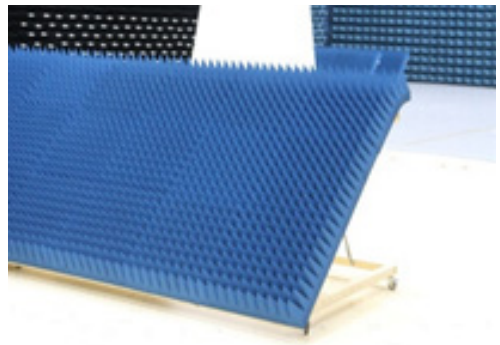


Fig. 8. Radar fence used for measurement

펜스 상단 팁에 의한 오차는 식 (12) ~ (15)와 같이 반무한 평면에 의한 회절 분석으로 추정할 수 있다⁶⁾. 이 때 z_0 는 펜스 상단부터 안테나까지의 높이, y_0 는 안테나부터 레이더 펜스까지의 거리, λ 는 파장, k 는 파수(wave number), E_0 는 입사 전계, E_s 는 산란 전계이다. 측정 시 레이더 펜스는 안테나로부터 12 m 간격으로 2 세트 설치하며, z_0 를 2 m로 고려하였을 때 d/λ 에 대해 입사된 전계 대비 산란된 전계의 상대적인 크기를 나타내면 Fig. 9와 같다. 각 펜스 팁에 의한 오차는 0.02 dB, 0.05 dB로 이 중 큰 값을 불확도 추정에 활용하였으며, 실제 측정에 사용되는 레이더 펜스가 나무로 제작되고 전자파 흡수재를 부착한 구조임을 고려하면 실제 오차는 이보다 작을 것으로 예상할 수 있다.

$$E_s = \frac{E_0}{2}(1-i)\exp(iky_0)F\left(z_0\sqrt{\frac{2}{\lambda y_0}}\right) \quad (12)$$

$$F(\eta) = \int_{-\eta}^{\infty} \exp(i\pi t^2/2)dt \quad (13)$$

$$z_0\sqrt{\frac{2}{\lambda y_0}} = \text{sgn}(\psi)\sqrt{\frac{2d}{\lambda}} \quad (14)$$

$$d = z_0^2/y_0, \quad \psi = \tan^{-1}(z_0/y_0) \quad (15)$$

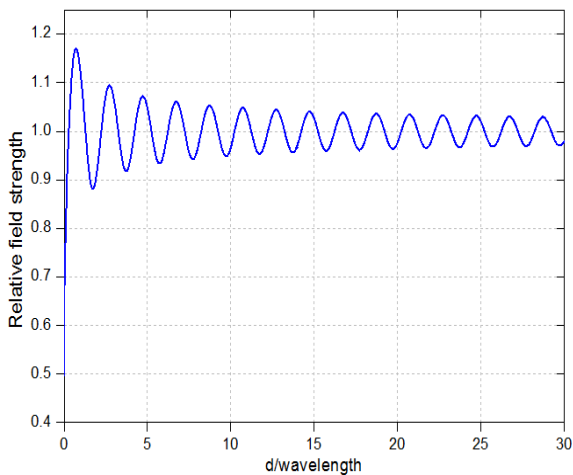


Fig. 9. Amplitude of relative field strength as a function of d/wavelength

3.6 RCS 측정 불확도 분석

앞에서 언급한 각 오차 요인에 대해 식 (3), (4)를 이용하여 불확도를 추정하였다. Table 1에 -20 dBsm의 피시험체 측정을 가정했을 때 각 요인별 오차를 나타내었으며, 불확도는 2D ISAR 측정에서 -2.1/1.4 dB, 3D 측정의 경우 -0.9/0.7 dB임을 확인할 수 있다. 이와 동일한 방법으로 피시험체의 RCS를 -20 ~ 30 dBsm으로 변경시키며 분석한 결과를 측정 방식에 따라 각각 Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다.

오차 요인을 잡음신호 레벨, 교정 표적의 RCS, 레이더/안테나 특성 관련 요인, 피시험체 설치 관련 요인, 시스템 고유의 오차 요인으로 구분하여 분석하였을 때, 측정 불확도에 주로 영향을 주는 요인은 측정 환경 내 잡음 신호 레벨, 교정 표적의 RCS, 시스템 고유 오차 요인 중 거리 보정에 따른 오차이며, 이를 제외한 레이더/안테나 및 피시험체 설치 관련 요인은 무시할 수 있거나 크기가 0.1 dB 이하였다.

Table 1. Estimated RCS uncertainties at 10 GHz

측정 오차 요인	오차 [dB]	
	2D	3D
측정환경 내 잡음 신호*	1.89	0.47
교정 표적의 RCS	0.28	0.28
레이더/안테나 특성 관련 요인	-	-
- average illumination	neg.	neg.
- 교차편파	0.04	0.04
- 드리프트	0.06	0.06
- 비선형성	0.10	0.10
- 주파수	neg.	neg.
피시험체 설치 관련 요인	neg.	neg.
시스템 고유의 오차 요인	-	-
- 거리 보정에 따른 오차	0.66	0.66
- Radar fence tip diffraction	0.05	n.a.
Overall uncertainty(RSS)	-2.1/1.4	-0.9/0.7

* 피시험체 RCS는 -20 dBsm으로 가정

거리 보정에 따른 오차는 피시험체의 크기나 구조 등의 영향을 받는 요소로 피시험체가 달라질 때마다

변동될 가능성이 있기 때문에 피시험체마다 그 특성을 반영하여 불확도를 추정하여야 하며, 교정 표적의 측정 시 정렬 상태를 좀 더 정밀히 확인하는 것이 교정 표적의 RCS 오차 감소에 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 반면에 측정환경 내 잡음 신호 레벨의 경우 측정 시설의 특성이 반영된 요소이다. 잡음 신호에 따른 오차를 줄이기 위해서는 피시험체 주변의 클러터 신호 제거에 용이한 3D 측정을 수행하거나 흡수재가 설치되지 않은 바닥면에도 흡수재를 설치하는 등 잡음 신호 감소를 위한 측정 환경의 개선이 필요할 것으로 생각된다. 측정 환경이 개선될 경우, 교정 표적 또한 개선된 환경에서 측정되기 때문에 교정 표적의 RCS 측정 정확도도 함께 향상될 것으로 기대된다.

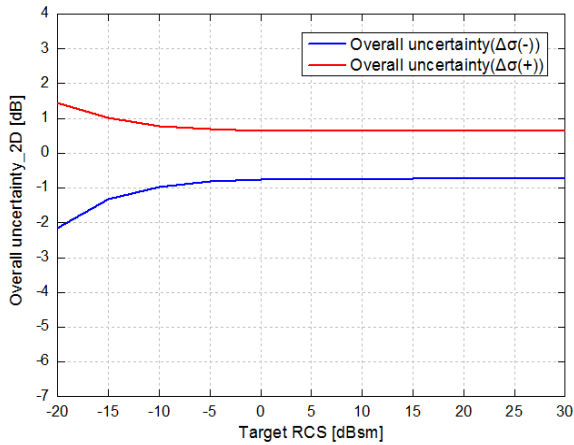


Fig. 10. Estimated RCS uncertainty(2D, 10 GHz)

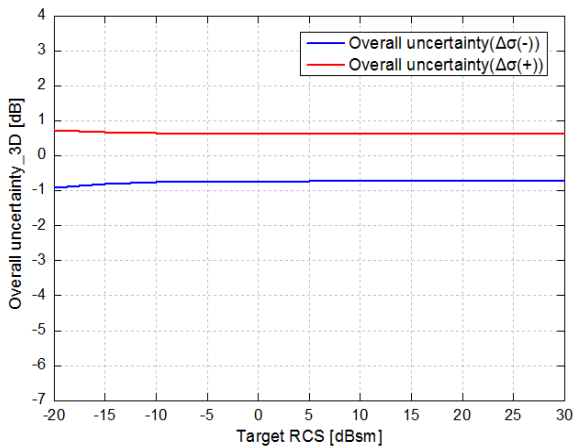


Fig. 11. Estimated RCS uncertainty(3D, 10 GHz)

4. 결론

본 논문에서는 실내 근전계 RCS 측정 시스템의 오차 요인을 식별하고, 10 GHz에서 2D ISAR 및 3D 측정의 불확도를 분석하였다. 배경잡음 신호, 교정 표적의 RCS, 레이더/안테나 및 피시험체 설치 관련 요인, 시스템 고유의 요인으로 구분하여 분석하였으며, 본 시스템만이 가지고 있는 고유한 요인으로 데이터 후처리 과정에서 거리 보정에 따른 오차와 레이더 펜스 상단 팁에서의 회절 성분을 찾을 수 있었다. 측정 불확도에 가장 크게 기여하는 오차 요인은 측정환경 내에서의 잡음 신호였으며, 잡음신호 레벨을 감소시킬 수 있도록 측정 환경을 개선하면 향후 수행하는 RCS 측정의 정확도가 향상될 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] K. Zikidis, A. Skondras and C. Tokas, "Low Observable Principles, Stealth Aircraft and Anti-Stealth Technologies," *Journal of Computations & Modelling*, Vol. 4, No. 1, pp. 129-165, 2014.
- [2] E. F. Knott, J. F. Schaeffer and M. T. Tuley, "Radar Cross Section," 2nd Ed. Scitech Publishing Inc., 2004.
- [3] S. M. Chung, Y. Chou and Y. Chuang, "Radar Cross Section Analysis of Stealth Fighter Design: Key Factors and Limitations of Simulation," *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 201-214, 2016.
- [4] S. M. Chung, Y. Chou, and Y. Chuang, "Radar Cross Section Analysis of Stealth Fighter Design: Key Factors and Limitations of Simulation," *International Journal of Electrical Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 201-214, 2016.
- [5] V. G. Borkar, A. Ghosh, R. K. Singh and N. Chourasia, "Radar Cross Section Measurement Techniques," *Defence Science Journal*, Vol. 60, No. 2, pp. 204-212, 2010.
- [6] E. F. Knott, "Radar Cross Section Measurements," Scitech Publishing Inc., 2006.
- [7] R. B. Dybdal, "Radar Cross Section Measurements," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 75, No. 4, pp. 498-516, 1987.

- [8] ISO/IEC Guide 99:2007, "International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms(VIM)," 2007.
- [9] IEEE Std. 1502-2007, "IEEE Recommended Practice for Radar Cross-Section Test Procedures," Sep. 2007.
- [10] R. C. Wittmann, M. H. Francis, L. A. Muth and R. L. Lewis, "Proposed Uncertainty Analysis for RCS Measurements," Natl. Inst. Stand. Tech. Int. Rep. NISTIR 5019, Jan. 1994.
- [11] L. Sevgi, Z. Rafiq and I. Majid, "Radar Cross Section(RCS) Measurements," IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 55, No. 6, pp. 278-291, 2013.