

항공기 탑재 AESA 안테나의 이득 대 잡음온도비 계산 및 측정

Gain Over Temperature (G/T) Calculation and Measurement for Airborne AESA Antennas

박 홍 우

Hongwoo Park

요 약

본 논문에서는 항공기 탑재 능동전자주사식 위상배열(active electronically scanned array, AESA) 안테나의 주요 특성인 이득 대 잡음온도비(gain over temperature, G/T)에 대한 계산 및 측정방법을 제시하며, 실제 사례에 대한 계산 및 측정을 통해 제안한 계산 및 측정방법이 유효한 수준임을 확인하였다. 이를 위해 기존 논문에서 제시된 계산방법을 활용하여 AESA 안테나의 G/T를 계산하고, 제작된 2대의 동일한 AESA 안테나를 활용하여 무반향실에서 G/T를 측정하였다. 계산된 G/T는 -9.2 dB/K, 측정된 G/T는 $-10.1 \sim -8.2$ dB/K로, 예측한 결과와 비교하여 1 dB 이내의 차이를 보이며, 이를 통해 제안된 G/T의 계산 및 측정방법이 유효한 수준임을 확인하였다. 제안된 방법은 비슷한 개념으로 설계된 다른 위상 배열 안테나에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract

This paper describes the calculation and measurement method of gain over temperature (G/T), which is the main characteristic of an airborne active electronically scanned array (AESA) antenna. Accordingly, we calculated the G/T of an AESA antenna based on earlier approaches. Then, we measured the G/T of two same AESA antennas in an anechoic chamber. The calculated and measured G/T of the AESA antenna were -9.2 dB/K and in the range of -10.1 to -8.2 dB/K, respectively. Based on the analysis and measurement, we proved that the proposed method was valid. The proposed method can also be used for other types of phased array antenna systems.

Key words: AESA Antenna, Transmit Receive Module, Gain Over Temperature(G/T), Airborne Radar, Noise Figure

I. 서 론

AESA 레이더는 현대 전투기의 사격통제에 필요한 핵심 센서로, 공대공/공대지/공대해 표적에 대한 탐색/추적 기능 및 유도탄/투하무장의 발사에 필요한 표적정보 제공을 통해 조종사가 위협을 식별하고, 이에 대처할 수 있도록

록 한다.

AESA 안테나는 능동전자주사식 위상배열(active electronically scanned array) 안테나의 줄임말로, 기계주사식 배열 안테나(mechanically scanned array, MSA)와는 다르게 신호증폭 및 위상제어를 위한 송수신모듈이 분산 배치되어 전자적으로 빔조향을 수행하는 방식의 안테나를

국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 17, 2020 ; Revised December 1, 2020 ; Accepted December 15, 2020. (ID No. 20201117-100)

· Corresponding Author: Hongwoo Park (e-mail: hwpark43@add.re.kr)

뜻한다.

레이다의 성능을 분석하기 위해서는 안테나의 송/수신 이득 및 잡음지수의 계산 및 측정이 중요하며, 이를 이용해 레이다 방정식으로 최대 탐지거리 등을 도출하게 된다^{[1][2]}. 그러나 AESA 안테나의 경우, 다수의 단위 안테나 및 저잡음증폭기 등 능동소자를 포함한 송수신모듈로 구성되며, 출력은 이들의 합으로 나타나므로 기존과 같은 방식으로는 이득 및 잡음지수를 정의 및 측정하기 어렵다. 따라서, AESA 안테나는 이득 대 잡음온도비(gain over temperature, G/T)를 주요 성능지수로 계산 및 측정하며, 이는 탐지거리 계산 등에 중요한 변수로 작용하므로 정확한 예측 및 측정이 필요하다.

AESA 안테나의 G/T 계산방법과 관련해서는 국외의 여러 사례가 존재하며^{[3]~[5]}, 측정방법에 대한 사례도 일부 존재하나^{[6][7]}, 참고문헌 [3]~[5]의 경우, 계산방법만 제시하며, 참고문헌 [6]과 [7]은 구체적인 측정방법 및 조건 등이 제시되어 있지 않거나 계산결과와의 비교는 없어 계산결과와 측정결과간의 연관성을 확인하기는 힘들었다.

본 논문에서는 참고문헌 [3]~[5]에서 제시된 계산방법을 토대로 실제 항공기 탑재 AESA 안테나의 RF 회로 구성을 적용하여 G/T를 계산하고, 동일한 방식으로 제작된 2대의 AESA 안테나를 이용해 무반향실에서 측정된 결과를 비교/분석한 결과를 제시함으로써 참고문헌 [3]~[5]를 이용하여 도출한 G/T 계산 수식 및 본 논문에서 제안한 측정방법이 유효한 수준임을 확인하였다.

II. AESA 안테나의 G/T 계산

2-1 AESA 안테나의 RF 회로 구조 및 등가모델

G/T를 계산하기 위해서는 우선 AESA 안테나 자체의 RF 회로 구조를 이해하여 이를 등가회로화 할 필요가 있으며, 그 구조는 그림 1과 같다. 복사소자(radiating element)는 소형 안테나로, 신호를 공기중으로 방사하고, 돌아온 신호를 받아 TRM으로 전달한다. 송수신모듈(transmit receive module, TRM)은 레이다 신호를 위상천이 및 증폭하여 복사소자로 전달하고, 표적을 맞고 돌아온 신호를 저잡음 증폭 및 위상천이하여 N-way 결합기에 전달한다.

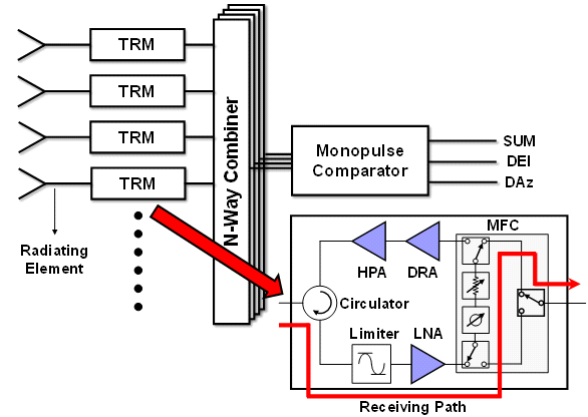


그림 1. 일반적인 항공기용 AESA 안테나의 RF 회로 구조
Fig. 1. Typical RF chain structure of airborne AESA antenna.

단일 복사소자로 들어온 신호는 TRM 내부의 써큘레이터(circulator)를 통해 수신경로로 전달되고, 리미터(limiter)의 통과 범위 내의 진폭을 가진 신호는 저잡음증폭기(low noise amplifier, LNA)를 통해 증폭되며, 다기능 칩(multi-function chip, MFC)을 통해 위상 및 크기가 조정된다. N-way 결합기는 모노펄스 처리를 위하여 총 4개로 구성되고, TRM으로부터 전달된 신호를 결합한다. 모노펄스 비교기(monopulse comparator)는 보통 하이브리드 커플러 4개로 구성되며, 4개의 N-way 결합기로부터 전달된 신호를 이용해 합채널(Σ) 및 고각/방위각 차 채널(ΔA_z , ΔE_I)을 제공하여 표적을 맞고 돌아온 신호를 모노펄스 처리할 수 있도록 한다.

그림 2는 G/T 계산을 위해 작성된 AESA 안테나의 수

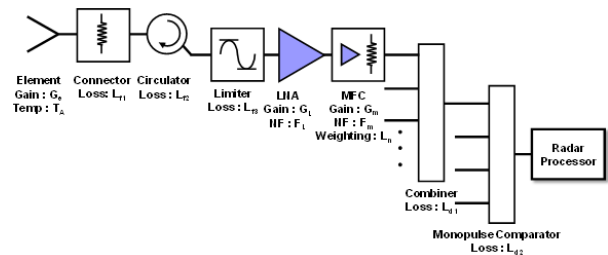


그림 2. G/T 분석을 위한 AESA 안테나 수신 경로 등가 모델
Fig. 2. Equivalent RF circuit model of AESA Rx path for G/T analysis.

신경로 등가모델이다. 그림에서 볼 수 있듯 LNA, MFC를 제외한 모든 RF 회로는 lossy network로 볼 수 있다. 커넥터, 서큘레이터 및 리미터의 손실은 $L_{f1} \sim L_{f3}$ 으로 정의하고, N-way 결합기와 모노펄스 비교기의 손실을 $L_{d1} \sim L_{d2}$ 로 정의한 이유는 2-2장에서 계산을 간편하게 하기 위해서이다.

2-2 등가모델에 기반한 G/T 계산

AESA 안테나의 G/T를 분석하기 위해서는 능동소자 및 수동소자에 대한 잡음 전력을 이해할 필요가 있다. 그림 3(a)와 같은 능동소자의 경우, 출력 잡음전력 N_0 는 식 (1)과 같고, 그림 3(b)와 같은 수동소자의 경우 출력 잡음전력 N_0 는 식 (2)와 같다^[8].

$$N_0 = GN_i + N_{added} = GkT_iB + GkT_0(F-1)B \quad (1)$$

$$N_0 = \frac{N_i}{L} + N_{added} = \frac{kT_iB}{L} + \frac{T_0(L-1)B}{L} \quad (2)$$

N_i : 입력 잡음전력

N_0 : 출력 잡음전력

N_{added} : 소자로 인해 추가된 잡음전력

T_i : 입력 잡음온도

T_0 : 실온

B : 대역폭

G : 능동소자 이득

F : 능동소자 잡음지수

L : 수동소자로 인한 손실

k : 볼츠만 상수($-198.6 \text{ dBm/(K} \cdot \text{Hz)}$)

참고문헌 [3]에서 제안된 계산방식을 활용하기 위해 그림 2의 수신경로 등가 모델을 좀 더 간략화하면 그림 4와

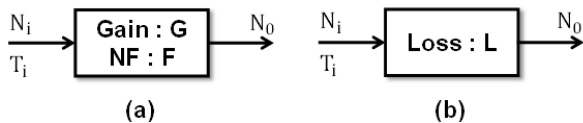


그림 3. G/T 분석을 위한 잡음 모델 (a) 능동소자; (b) 수동소자

Fig. 3. Noise model for G/T analysis. (a) active element; (b) passive element.

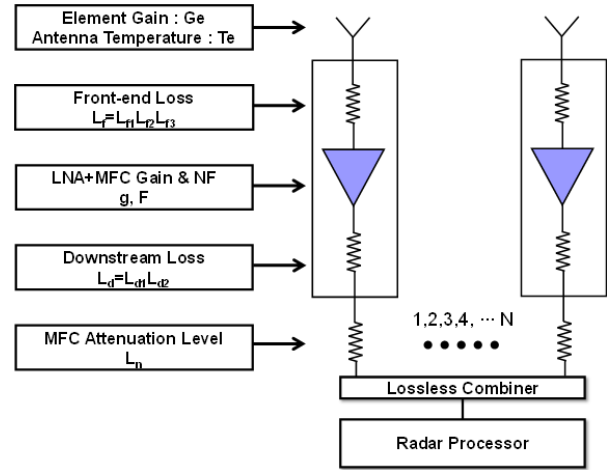


그림 4. 간략화된 AESA 안테나 수신 경로 등가 모델

Fig. 4. Simplified RF circuit model of AESA antenna Rx path.

같이 나타낼 수 있다. LNA 앞단의 소자들은 모두 수동소자로 모델링할 수 있으며, MFC 뒷단의 결합기는 삽입손실을 모두 곱하고 나면 하나의 무손실 결합기로 모델링할 수 있다.

여기서 LNA+MFC 이득 g 및 잡음지수 F 는 cascade system 이득 및 잡음지수 계산방법^[8]에 따라 식 (3)과 같이 정의할 수 있다. 여기서 g 와 F 를 계산하는 이유는 참고문헌 [3]에서 제안한 모델과 일치시켜 수식을 이용하기 위함이다.

$$g = G_L G_m, \quad F = F_L + \frac{(F_m - 1)}{G_L} \quad (3)$$

G_L : LNA 이득(그림 2)

G_m : MFC 이득(그림 2)

F_L : LNA 잡음지수(그림 2)

F_m : MFC 잡음지수(그림 2)

그림 4에서 MFC의 이득과 잡음지수, MFC attenuation level은 각각 L_d 를 중심으로 떨어져 있는데, MFC는 칩의 특성상 내부에서 신호를 소폭 증폭하므로 LNA와 직렬로 연결된 증폭기로 간주하여 이득 및 잡음지수를 합하여 계산하고, MFC attenuation level은 AESA 안테나의 부엽 레벨을 조정하기 위하여 감쇄값을 입력하는 것이므로 수동소자 성분이며, 수동 소자의 특성상 직렬 연결시에는

앞뒤 순서에 따른 잡음지수의 변화는 없으므로 참고문헌 [3]에서 제안한 모델과 일치시켜 수식을 이용하기 위해서이다.

그림 3의 잡음 모델과 그림 4의 수신 경로 등가 모델을 이용하여 1 채널당 발생하는 잡음전력 n_k 를 계산하면 식 (4)와 같다^[3].

$$n_k = \frac{kT_e B g}{L_f L_d L_k} + \frac{kT_0 B (L_f - 1) g}{L_f L_d L_k} + \frac{kT_0 B (F - 1) g}{L_d L_k} + \frac{kT_0 B (L_d - 1)}{L_d L_k} + \frac{kT_0 B (L_k - 1)}{L_k} \quad (4)$$

식 (4)를 통해 채널당 잡음 n_k 를 구하면 잡음전력의 최종 합 n_o 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 N 으로 나누는 이유는 윌킨슨 결합기(Wilkinson matched combiner)의 S 파라미터 특성에 따른 것이며^[9], 제작된 결합기 또한 다수의 윌킨슨 결합기로 구성되어 있다.

$$n_o = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N n_k \quad (5)$$

한편, 각 채널로 입력되는 신호의 합 S_o 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다^[4]. 여기서 s_i 는 단일 복사소자를 통해 각 채널에 인가된 신호 레벨을 의미한다.

$$S_o = \frac{s_i g}{N L_f L_d} \left(\sum_{k=1}^N \sqrt{1/L_k} \right)^2 \quad (6)$$

이를 이용하여 AESA 안테나의 출력 신호대잡음비 S_o/n_o 를 구하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{S_o}{n_o} = \frac{N s_i \left(\sum_{k=1}^N \sqrt{1/L_k} \right)^2}{k T B N \sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{L_k} \right)} = \frac{P \lambda^2 G}{4 \pi k T B} \quad (7)$$

여기서 P 는 AESA 안테나로 입사되는 평면파의 전력밀도를 의미하며, G 는 AESA 안테나의 이득, k 는 볼츠만 상수, λ 는 파장 길이를 의미한다. T 는 식 (8)과 같으며, 이를 AESA 안테나의 잡음온도로 정의할 수 있다.

$$T = T_e + T_0 \left(L_f F - 1 - \frac{L_f}{g} + \frac{N L_f L_d}{g \sum_{k=1}^N \frac{1}{L_k}} \right) \quad (8)$$

여기서 식 (9)는 안테나의 aperture efficiency로 정의할 수 있고^[4], s_i 는 단일 복사소자 이득 G_e 를 포함한 식 $G_e P \lambda^2 / 4 \pi$ 로 정의할 수 있으므로 수신이득 대 잡음비 G/T 는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{\left(\sum_{k=1}^N \sqrt{1/L_k} \right)^2}{N \sum_{k=1}^N \frac{1}{L_k}} \quad (9)$$

$$\frac{G}{T} = \frac{N G_e \eta}{T} \quad (10)$$

2.3 실제 사례에 대한 G/T 계산결과

그림 5는 측정 대상 AESA 안테나의 개구면 및 활성화된 TRM 배치를 나타낸 그림이다. 안테나의 개구면은 지름 800 mm의 원형이며, 측정을 대상으로 하는 빔 모드는 그림 5와 같이 중앙에 배치된 34개의 TRM이 활성화된다. 본 모드에서는 방사패턴의 부엽준위를 낮추기 위한 weighting 값은 별도로 설정하지 않았다. 따라서 N 은 34로 정의할 수 있고, L_k 은 모두 1로 정의할 수 있다.

위 TRM 배치 및 진폭 가중치를 이용하여 AESA 안테나의 방사패턴 $E(\theta, \varphi)$ 를 식 (11)을 통해 예측할 수 있으며, 방위각에 대한 주파수별 방사패턴 예측결과를 그림 6

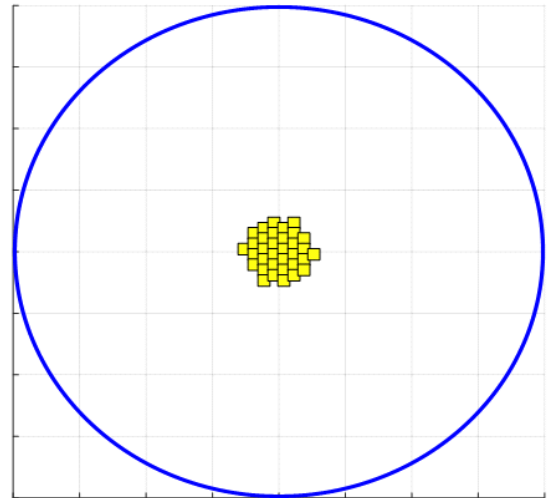


그림 5. AESA 안테나의 개구면과 활성화된 TRM 분포
Fig. 5. Aperture and activated TRMs of AESA antenna.

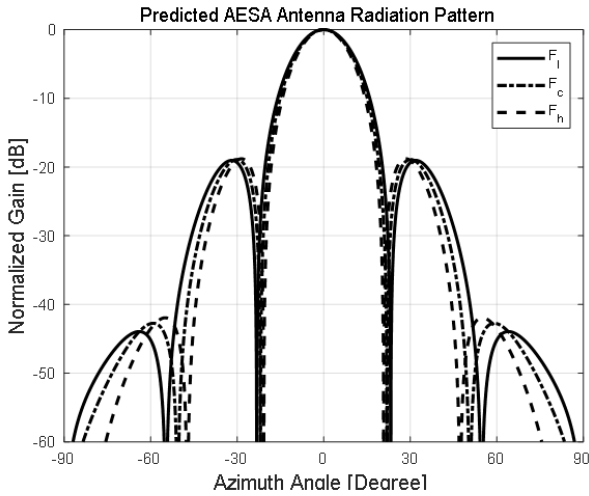


그림 6. AESA 안테나 방사패턴 예측결과(방위각)

Fig. 6. Predicted AESA antenna radiation pattern(azimuth cut).

과 같다.

$$E(\theta, \phi) = \sum_{k=1}^n E_e(\theta, \phi) \times A_k \times e^{\frac{2\pi}{\lambda}(X_k U + Y_k V) - \frac{2\pi}{\lambda_0}(X_k U_0 + Y_k V_0)} \quad (11)$$

$E_e(\theta, \phi)$: 단일 복사소자 방사패턴 ($\cos^{1.5}(\theta)$ 로 근사)

A_k : TR 모듈별 진폭 가중치 값 ($\sqrt{1/I_k}$)=1

X_k, Y_k : (X,Y) 좌표계상 단일 복사소자 위치(mm)

U, V : $\sin\theta\cos\phi, \sin\theta\sin\phi$ (관찰각)

U_0, V_0 : $\sin\theta_0\cos\phi_0, \sin\theta_0\sin\phi_0$ (빔 조향각)

λ : 파장 길이(mm)

식 (11)은 인접한 복사소자간의 커플링 및 TR 모듈간 진폭/위상오차 등을 포함하여 정확하게 예측한 수식은 아니며, 근전계 측정결과에 대한 확인용으로 사용한다.

측정 대상 AESA 안테나의 수신경로 구성요소별 특성은 표 1과 같으며, 표 1을 이용하면 식 (4)~식 (10)에 들어갈 변수들을 확정할 수 있다. 단위 복사소자 이득 G_e 는 설계 결과, 5 dBi로 예측되었고, T_e 는 참고문헌 [9]를 참고하면, 무반향실에서 측정할 경우, 무반향실 온도로 정의할 수 있으며, 무반향실은 섭씨 24도로 항상 유지되므로 297 K로 정의할 수 있다. T_0 는 AESA 안테나 설계상 T/R 모듈의 수신모드 동작시의 평균 포화온도가 섭씨 34도이므로 307 K로 설정하였다. 식 (4)~식 (10)을 활용하고, 계

표 1. AESA 안테나 수신경로 구성요소별 특성

Table. 1. Component characteristic for AESA antenna Rx path.

Equivalent model (Fig. 4) component	Component	Gain (dB)	NF (dB)
Front-end loss (L_f)	Connector (L_{f1})	-1.2	1.2
	Circulator (L_{f2})	-0.35	0.35
	Limiter (L_{f3})	-1.9	1.9
LNA+MFC (g, F)	LNA (G_L, F_L)	37.40	1.22
	MFC (G_m, F_m)	3	5
Downstream loss (L_d)	Combiner (L_{d1})	-12.25	12.25
	Monopulse comparator (L_{d2})	-8.6	8.6
MFC attenuation (L_k)	MFC control value	0 (all channels)	0 (all channels)
Other parameters	N :34, T_e : 297K, T_0 : 307 K, G_e : 5 dBi, Boltzmann's constant (k) : -198.6 dBm/(K · Hz)		
G/T calculation result	-9.2 dB/K		

산 도구로 Microsoft Excel을 이용한 결과, AESA 안테나의 G/T 값은 -9.2 dB/K로 예측되었다.

III. G/T 측정방법 및 측정결과

3-1 G/T 측정방법

G/T는 안테나의 수신이득과 안테나 수신 Σ 채널의 잡음 전력밀도를 측정함으로써 얻을 수 있다. AESA 안테나의 이득을 G_{AESA} , 잡음 전력 밀도를 n_{AESA} 라고 하면, G/T는 식 (12)를 활용해 구할 수 있다. 여기서 k 는 볼츠만 상수이다.

$$G/T = \frac{k G_{AESA}}{n_{AESA}} \quad (12)$$

수신이득은 개구면이 큰 AESA 안테나의 경우, Far-field 환경을 구현하기에 제약사항이 많으므로 근전계 스캐너를 이용하여 측정하고, 안테나의 잡음 전력밀도는 신호분석기를 AESA 안테나의 Σ 채널에 연결하여 측정한다.

AESA 안테나의 수신패턴 및 이득은 그림 7과 같은 근접전계 측정 시설을 통해 측정할 수 있다. RF 신호의 다중 반사 억제 및 안전을 위해 측정은 무반향실 내에서 수행하고, AESA 안테나와 근접전계 스캐너 이외의 장비는 무반향실 밖에 배치된다. 냉각기 및 전원공급기는 각각 AESA 안테나의 동작에 필요한 냉각수 및 전원을 안정적으로 공급하기 위해 배치된다. AESA 안테나 시험장비는 제어/운용 PC의 명령에 따라 안테나의 빔 조향각을 조절하고, TRM의 상태정보를 수신하여 제어/운용 PC에 전달한다. 제어/운용 PC는 사용자가 AESA 안테나를 조작하고, TRM의 상태를 확인할 수 있는 GUI(graphic user interface) 환경을 제공한다. 네트워크 분석기는 안테나장치와 근접전계 스캐너간 S파라미터를 추출하여 근접전계

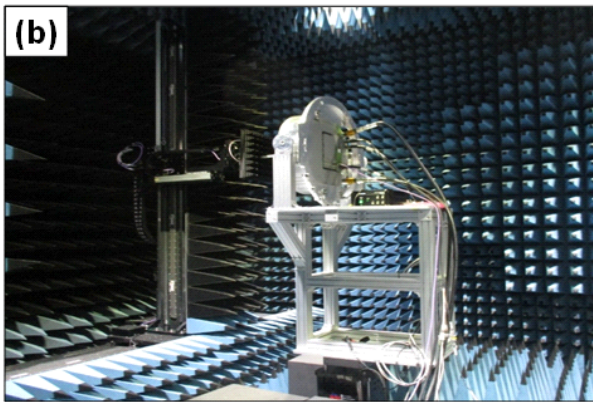
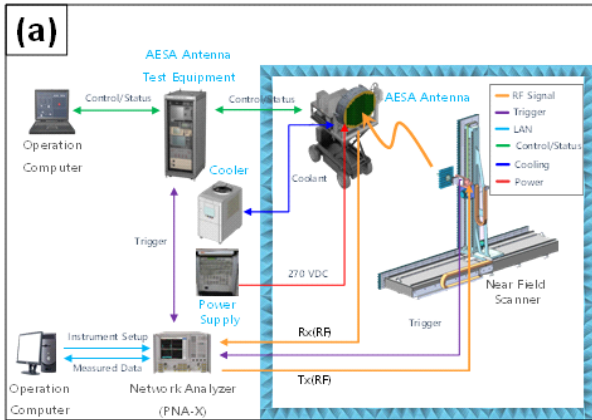


그림 7. AESA 안테나 수신패턴 측정. (a) 측정 구성도, (b) 측정 장면

Fig. 7. Receive pattern measurement of AESA antenna. (a) measurement schematics, (b) measurement scene.

운용컴퓨터가 데이터를 분석하여 시험결과를 추출할 수 있도록 한다. 근접전계 운용컴퓨터는 네트워크 분석기가 근접전계 스캐너 및 안테나장치에 트리거링 명령을 보내어 타이밍에 맞게 송/수신 경로가 연결되게 하며, 근접전계 스캐너를 조작한다. 또한 네트워크 분석기가 제공한 S파라미터 데이터를 통해 근접전계 측정결과인 안테나 원전계 패턴을 계산한다.

그림 8~그림 10은 동일한 방식으로 제작된 2대의 AESA 안테나에 대해 수신 패턴을 측정한 결과이다. G/T 계산결과와 유효성을 다양한 사례에서 확인하고자 총 2대의 안테나에 대해 동작 대역폭 내에서 최저(F_l), 중간(F_c), 최대 주파수(F_h)에 대하여 측정하였다. 주파수별 방사패턴 측정결과를 통해 알 수 있듯, 주빔(main lobe) 및 부엽 레벨이 식 (11)을 통해 예측한 결과와 유사하며, 이를 통해 수신패턴이 설계된 대로 형성됨을 확인할 수 있다.

시뮬레이션과 측정결과간 차이가 첫 번째 부엽 중간부터 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 식 (11)로 예측한 결과가 인접한 복사소자간 커플링을 반영하고 있지 않으며, 안테나의 구조물 형상으로 인한 전자파 왜곡이 반영되지 않았으므로 차이를 보이는 것으로 판단된다. 또한, 측정 결과의 비대칭성은 AESA 안테나의 각 채널간 위상 및 진폭 특성이 동일하지 않음으로 인해 나타나는

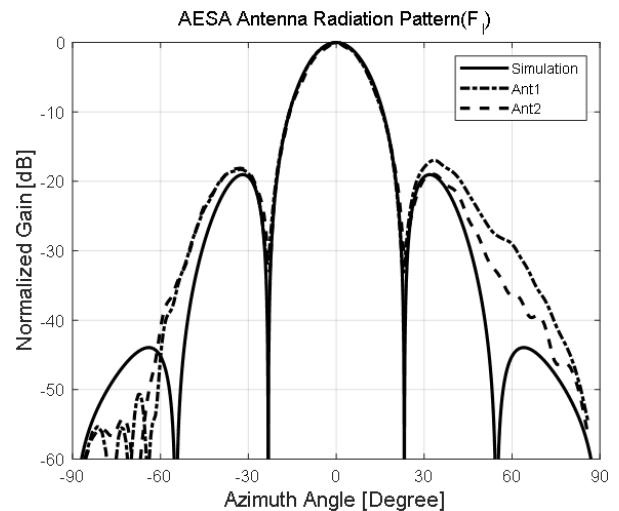


그림 8. AESA 안테나 수신패턴(F_l) 측정결과

Fig. 8. Receive pattern measurement result of AESA antenna (F_l).

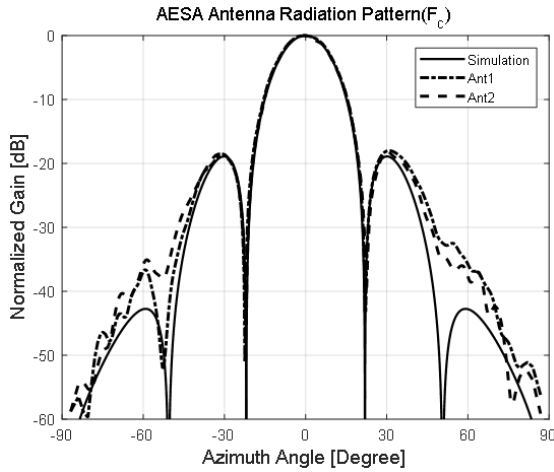


그림 9. AESA 안테나 수신패턴(F_c) 측정결과
Fig. 9. Receive pattern measurement result of AESA antenna (F_c).

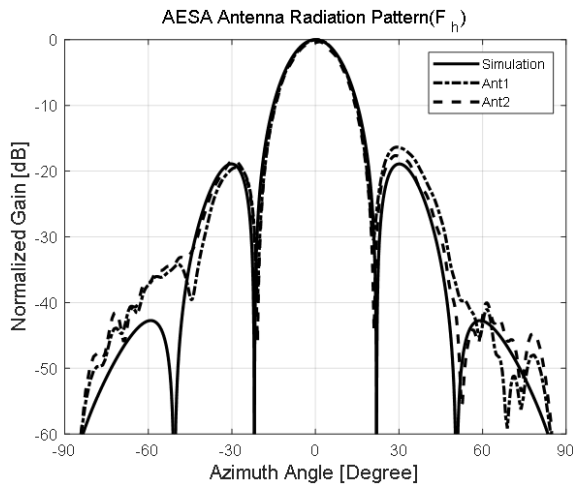


그림 10. AESA 안테나 수신패턴(F_h) 측정결과
Fig. 10. Receive pattern measurement result of AESA antenna (F_h).

것으로 추측된다.

한편, AESA 안테나의 잡음온도는 그림 11의 구성을 통해 측정할 수 있다. 그림 11(a)와 같이, 그림 7(a)에 나타난 구성에서 근접전계 측정 시스템의 구성품은 모두 제외하고 AESA 안테나의 운용에만 필요한 장비를 이용하여 시험하며, AESA 안테나의 수신 채널을 신호분석기에 연결한 후, 잡음 전력을 측정하여 T 를 구한다. 이 때 안테나 주변온도 및 TRM 온도는 냉각기를 설정하여 표 1의

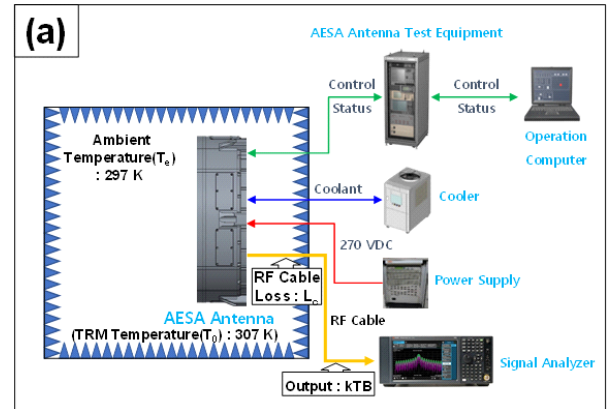


그림 11. AESA 안테나 잡음 레벨 측정 방법
Fig. 11. AESA antenna noise level measurement method.

조건과 같은 수준으로 유지한다.

상기 조건에서, AESA 안테나 출력 및 RF 케이블을 거쳐 출력되는 잡음전력을 kTB라고 하면, RF 케이블로 인한 손실을 곱한 kTB/L_c 가 AESA 안테나로부터 생성된 잡음 전력이라고 할 수 있고, 이를 잡음온도 T 로 바꾸기 위해서는 kB/L_c 로 나누어야 한다. k 는 볼츠만 상수이므로 고정값이며, 케이블로 인한 RF 손실 L_c 는 네트워크 분석기 또는 스펙트럼 분석기 및 신호발생기를 이용하여 측정할 수 있다. 대역폭인 B 의 경우, 스펙트럼 분석기를 이용하여 잡음 전력을 측정 후, 스펙트럼 분석기의 분석 기능인 channel power 측정 기능 또는 noise marker를 이용하여 power spectral density를 구함으로써 나눌 수 있다.

그림 12는 2번 AESA 안테나에 대해 주파수 F_c 에서 잡

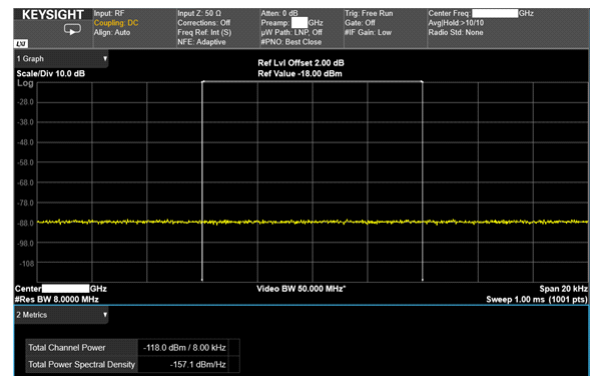


그림 12. AESA 안테나의 잡음 레벨 측정결과
Fig. 12. AESA antenna noise level measurement result.

음 레벨을 측정된 결과로, 신호분석기는 Keysight 사의 N9040B 제품을 활용하였다. 측정 시 주파수별 RF 케이블의 손실은 네트워크 분석기로 측정하여 신호분석기의 offset 값으로 미리 적용하였다. F_c GHz에서 20 KHz Span으로 측정된 결과이며, channel power는 중심 8 KHz에서 계산하였다. 잡음 레벨의 변동성을 최대한 낮추기 위하여 계측기의 trace average 기능과 power(RMS) detection 기능^[10]을 활성화시켰으며, 계측기 설정 조건에 따른 channel power density 측정결과는 -157.1 dBm/Hz이었다.

3-2 G/T 측정결과

표 2는 2대의 AESA 안테나에 대해 G/T를 측정된 결과를 나타낸 표이다. 표에서 알 수 있듯, 예측결과에 대비하여 1 dB 이내의 편차로 측정된 G/T 값이 일치함을 확인할 수 있으며, 2-2장을 통해 예측한 G/T 예측방식이 유효한 수준임을 알 수 있다. 예측결과와의 차이는 TRM간의 위상/진폭차이로 인한 combining mismatch 및 TRM간 온도분포의 불균일성 등 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하였을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존에 제안된 수식 및 등가모델을 활용하여 항공기 탑재 AESA 안테나에 대한 G/T를 분석하

표 2. AESA 안테나에 대한 G/T 측정결과
Table. 2. G/T measurement result of AESA antenna.

Estimation/measured antenna		Noise level (dBm/Hz)	Rx gain (dB)	G/T (dB/K)
Estimation (Refer to Table 1)		-		-9.2
AESA antenna #1	F_l GHz	-158.3	31.7	-8.6
	F_c GHz	-156.7	31.8	-10.1
	F_h GHz	-157.7	31.8	-9.1
AESA antenna #2	F_l GHz	-158.1	32.3	-8.2
	F_c GHz	-157.1	31.6	-9.9
	F_h GHz	-158.6	31.7	-8.3
※ Boltzmann's constant (k): -198.6 dBm/(K · Hz)				

고, G/T에 대한 측정방법 및 그 결과를 제시하였다. 제작된 2대의 AESA 안테나를 이용하여 제시한 방법을 통해 G/T를 측정된 결과, 제안된 등가모델을 활용하여 예측한 결과와 유사함을 최종 확인하였다. 본 논문을 통해 제안된 방식으로 다양한 능동위상배열 안테나의 G/T예측 및 측정이 가능할 것으로 판단된다.

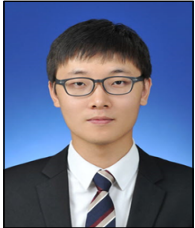
References

- [1] T. H. Kim, B. G. Choi, H. Y. Lee, and C. S. Cho, "Receiver gain of phased array radar-dependence on ADC Characteristics," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 1, pp. 52-59, Jan. 2009.
- [2] T. H. Kim, S. J. Lee, D. H. Lee, Y. S. Hong, and C. S. Cho, "Design and measurement of active phased array radar digital receiver," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 3, pp. 371-379, 2011.
- [3] J. J. Lee, "G/T and noise figure of active array antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 42, no. 2, pp. 241-244, Feb. 1993.
- [4] E. Brookner, "Active-phased-array system noise temperature," in *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, May 2008, pp. 1-6.
- [5] D. Busuioic, M. Shahabadi, A. Borji, and S. Safavi-Naeini, "G/T of multi-segment active arrays-dependence on array configuration," in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium*, Monterey, CA, Jun. 2004, vol. 1, pp. 133-136.
- [6] G. E. Miller, D. N. Rasmussen, "Measurement of the G/T of a 20-GHz active receive phased array antenna," in *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium and URSI National Radio Science Meeting*, Seattle, WA, Jun. 1994, vol. 1, pp. 258-261.
- [7] A. P. Chippendale, A. J. Brown, R. J. Beresford, G. A. Hampson, R. D. Shaw, and D. B. Hayman, et al,

- "Measured aperture-array noise temperature of the Mark II phased array feed for ASKAP," in *2015 International Symposium on Antennas and Propagation(ISAP)*, Hobart, Nov. 2015, pp. 1-4.
- [8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed. New Delhi, John Wiley & Sons, pp. 309-324, 487-500, 2005.
- [9] J. D. Kraus, R. J. Marhefka, *Antennas for All Applications*, 3rd ed. Boston, MA, McGraw Hill, pp. 401-402, 2003.
- [10] Keysight Technologies, *Spectrum Analyzer Basics: Application Note 150*, pp. 28-40, 2020.

박 홍 우 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8619-1017>



2014년 2월: 경북대학교 전기공학과 (공학사)

2016년 2월: 경북대학교 전기공학과 (공학석사)

2016년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] AESA 안테나, T/R 모듈 설

계/제작, 항공기 레이더