

모노펄스 레이더용 Cavity-Backed 마이크로스트립 안테나 개발

Cavity-Backed Microstrip Antenna for a Monopulse Radar

박종국 · 나형기 · 구연덕* · 이종민*

Jong-Kuk Park · Hyung-Gi Na · Youn-Duck Goo* · Jong-Min Lee*

요 약

본 논문에서는 모노펄스 레이더용 cavity-backed 마이크로스트립 안테나를 설계 및 제작하고, 제작된 안테나의 측정 결과를 분석하여 레이더 시스템에 잘 적용될 수 있음을 보였다. 일반적인 마이크로스트립 안테나의 방위각 빔폭에 비해, 시스템에서 요구하는 방위각 빔폭이 상당히 넓기 때문에, 마이크로스트립 패치의 폭을 상당히 줄였으며, 이에 따른 대역폭의 감소는 유효 기판 두께를 증가시킴으로 보상하였다. 또한 각도에 따른 안테나 이득 변화에 대한 탐지 거리와 탐지 확률을 계산함으로써, 제작된 안테나가 이러한 레이더 시스템에 잘 적용될 수 있음을 보였다.

Abstract

A cavity-backed microstrip patch antenna for a monopulse radar system is designed and fabricated. Also, this antenna is shown to be suitable for the system by analyzing the measured results. Since the azimuthal beamwidth required by this system is quite broad compared to that of a usual microstrip antenna, the width of a microstrip patch is reduced considerably. The decrease of an antenna bandwidth due to the reduced patch width is compensated by increasing the effective substrate thickness. A detection range and a detection probability is calculated from the measured gain at a given angle, and this result shows that the fabricated antenna can be applied well to this monopulse radar system.

Key words : Monopulse Radar, Cavity-Backed Microstrip Antenna, Detection Range, Detection Probability

I. 서 론

일반적으로 마이크로스트립 안테나는 제작이 쉽고, 단면이 매우 얇아서 장착이 용이한 장점이 있으므로, 헤아릴 수 없을 정도의 수많은 응용 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 이러한 마이크로스트립 안테나의 응용으로서, 모노펄스 레이더에 장착되는 cavity-backed 마이크로스트립 안테나를 설계·제작하고 측정 결과를 분석하여, 제작된 안테나가 이 시스템에 잘 적용될 수 있음을 보이고자 한다. 먼저 주어진 레이더 시스템은 그림 1과 같다. 그림

1에서 3개의 안테나의 정면은 각각 45°씩 틀어져 있으며, 중앙에 있는 안테나가 송신 안테나이며, 나머지 두 안테나가 수신 안테나이다.

이 시스템의 목적은, 탐지를 원하는 물체에 의해 산란된 전파를 두 개의 수신안테나에서 수신했을 때 생기는 수신 전력의 차이로부터, 목표물의 방위각 위치를 알아내는 것이다. 그림 1과 같이 3개의 안테나를 이용하여 -45°~45° 사이에 있는 목표물의 탐지하기 위해서는, 이 방위각 범위 안에서의 안테나의 송수신 이득이 주어진 탐지 거리와 탐지 확률 등을 만족시켜야 한다. 그림 1에서 목표물이 -45°에

LG 이노텍(LG Innotek Co., Ltd.)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20020807-095

· 수정완료일자 : 2002년 11월 26일

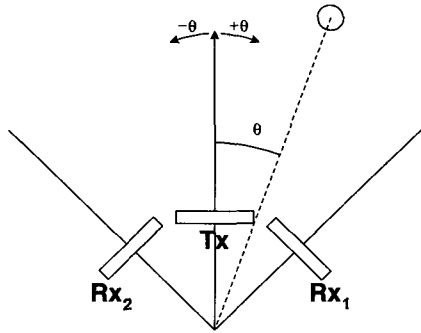


그림 1. 모노펄스 레이더 시스템
Fig. 1. Monopulse radar system.

있다고 가정하면, 송신 안테나는 목표물을 기준으로 45°방향으로 향해 있고, 두개의 수신 안테나는 각각 0°와 90°방향으로 향해 있게 된다. 따라서 두 개의 수신 안테나 사이에는 각도에 따른 이득의 차이 때문에 수신 전력의 차이가 생기게 되는데, 이러한 수신 전력의 차이로부터 목표물의 방위각 위치가 -45°라고 판정하게 되는 것이다. 그런데, 보통의 마이크로스트립 패치 안테나의 경우에는, 90° 방향에서의 안테나의 이득이 상당히 낮아서 수신 신호와 잡음을 거의 구분할 수 없다. 그러므로 그림 1에서 -45°근처에 있는 목표물에 대해 90°방향으로 향해 있는 1번 수신 안테나는 그 수신 전력이 매우 작게 되고, 따라서 두 수신 안테나 사이의 각도에 따른 수신 전력 차이의 변화가 거의 없어지게 되어, 방위각 오차가 커지게 된다. 따라서 가능한 한 안테나의 방위각 빔폭을 크게 하여 90° 방향에서의 이득을 크게 해야 하는 것을 알 수 있다. 그러나 안테나의 빔폭을 크게 하면 안테나의 이득은 감소하게 되는데, 레이더의 최대 탐지 거리는 안테나 이득이 커질수록 증가하므로, 안테나의 빔폭과 이득 사이에 최적점을 찾아내야 함을 알 수 있다. 일반적인 마이크로스트립 패치 안테나는 방위각 빔폭이 고각 빔폭에 비해 좁고, 또한 이 시스템에서 요구하는 값보다 작기 때문에 이 경우에 사용하기 어렵지만, 본 논문에서는 마이크로스트립 패치 안테나의 여러 가지 장점 때문에, 마이크로스트립 패치의 모양을 변형하여 방위각 빔폭과 안테나 이득을 최적화한 cavity-backed 마이크로스트립 패치 안테나를 제안하였다.

표 1. 안테나의 초기 사양
Table 1. Initial specification of an antenna.

상대 대역폭	> 4.4 %
방위각 빔폭	~90°
고각 빔폭	~60°
안테나 이득	> 7.28 dB

II. Cavity-backed 마이크로스트립 패치 안테나의 설계

주어진 시스템에 적절한 안테나를 제작하기 위한 초기 사양은 표 1과 같이 정하였다.

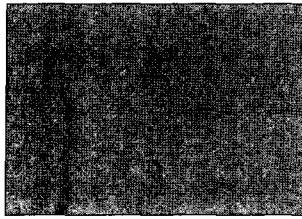
여기서의 초기 사양은 안테나의 빔 패턴을 Gaussian으로 가정했을 때, 주어진 탐지 거리와 탐지 확률을 만족시키도록 정해진 사양이다. 따라서 안테나의 패턴이 Gaussian 패턴과 다를 경우에는, 표 1에서의 초기 사양을 만족하지는 않더라도 레이더에서 요구하는 탐지 거리와 탐지 확률을 만족시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 초기 사양에 기초하여 안테나를 설계·제작하고, 이렇게 제작된 안테나의 측정값이 초기 사양을 만족시키기 보다는 전체 레이더 시스템에서 요구하는 탐지 거리와 탐지 확률을 만족시킬 수 있는가에 초점을 맞추었다.

표 1로 주어지는 초기 사양을 만족시키는 안테나의 구조는 여러 가지가 있을 수 있겠지만, 서론에서 언급한 바와 같이 마이크로스트립 패치 구조를 선택하였다.

보통의 마이크로스트립 패치 안테나는 그림 2 (a)와 같이 패치의 폭 방향이 길이 방향보다 크거나, 거의 비슷하게 설계한다^[1]. 따라서 보통은 고각 패턴이 방위각 패턴보다 넓다. 그러나 표 1에서 보듯이 이 경우에는 방위각 패턴이 고각 패턴보다 넓어야 하므로, 그림 2 (b)와 같이 패치의 폭 방향이 길이 방향보다 작게 설계하여야 한다.

일반적인 마이크로스트립 패치 안테나의 경우, 그 상대 대역폭이 2~3 % 정도로 작은 편이며, 안테나의 주파수 대역폭에 관해서는 다음과 같은 간단한 경험식이 존재한다^[2].

$$BW = 3.77 \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r^2} \right) (W/L)(t/\lambda_0) \quad (1)$$



(a)



(b)

그림 2. (a) 일반적인 패치, (b) 제안된 패치 모양
(a) Usual patch, (b) Proposed patch

여기서 W 와 L 은 각각 패치의 폭과 길이이며, ϵ_r 은 상대 유전율, t 는 기판의 두께이며 λ_0 는 자유 공간에서의 파장이다. 이 식은 기판의 두께 t 가 λ_0 보다 상당히 작을 때 성립하는 식이지만, 이 식으로부터 각 파라미터들에 대한 주파수 대역폭의 변화 경향을 살펴 볼 수 있다. 위 식에 의하면 패치의 폭이 감소하면 안테나의 주파수 대역폭이 작아짐을 알 수 있다. 그런데 설계하고자 하는 안테나의 경우, 요구되는 안테나의 주파수 대역폭은 일반적인 패치 안테나의 주파수 대역폭보다 조금 넓고, 빔 패턴을 만족시키기 위한 패치의 폭은 일반적인 패치 안테나의 폭보다 좁아야 하기 때문에, 주파수 대역폭 면에서 사양을 맞추기가 상당히 어렵다는 것을 알 수 있다. 식 (1)에 따르면 조절할 수 있는 파라미터는 유전율과 기판의 두께뿐이기 때문에, 요구되는 주파수 대역폭을 확보하기 위해서는 유전율이 낮고 두께가 두꺼운 기판을 사용해야 한다. 그러나 유전율이 낮은 기판들도 일반적으로 그 상대 유전율이 2.0 이상이며, 또한 상용의 기판들은 두께를 키우는데 한계가 있기 때문에, 본 논문에서는 유효 상대 유전율을 낮추면서 동시에 두께를 두껍게 할 수 있도록 foam을 접지면이 없는 기판 면에 대고, 접지면을 제공함과 동시에 장착의 편의성을 고려하여 그림 3에

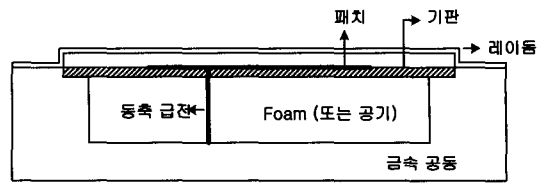


그림 3. Cavity-backed 마이크로스트립 패치 안테나의 구조

Fig. 3. Structure of a cavity-backed microstrip patch antenna.

서 보는 바와 같이 금속 공동의 개구면에 기판을 고정시킨 형태의 Cavity-backed 마이크로스트립 패치 안테나를 설계하였다.

이러한 형태의 안테나는 평판형(planar) 구조가 아니기 때문에, 일반적인 마이크로스트립 안테나 설계에 많이 사용하는 Ensemble과 같은 simulator를 이용할 수 없고, HFSS와 같은 3차원 simulator를 사용해야 한다. 그러나 일반적인 3차원 simulator의 경우, 해석 시간이 매우 오래 걸리는 단점이 있으므로, 본 논문에서는 금속 공동이 없는 상태에서 무한 기판을 가정하고 Ansoft Ensemble 7.0을 이용하여 초기 설계를 수행한 다음, 이를 바탕으로 얻어진 각 변수들의 초기값과 이 변수들을 미세 조정했을 때의 영향을 고려하여, 금속 공동이 포함된 최종 구조의 안테나를 Ansoft HFSS 8.0으로 설계하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 설계된 안테나는 레이돔을 고려하였으며, 사용한 레이돔은 두께 10 mm의 테플론 평판을 가공하여 레이돔 두께 3 mm로 제작하였다. 또한 커넥터는 가장 많이 사용하는 SMA 커넥터 대신 TNC 커넥터를 사용하였다. 이렇게 얻어진 안테나의 치수는, 중심 주파수에서의 자유 공간 파장을 λ_0 라 할 때 그림 4와 같고, 이를 제작하여 측정하였다.

일반적으로 안테나를 설계하여 실제 제작하면, 제작 오차와 다른 여러가지 이유 때문에 안테나의 중심 주파수 등이 설계값에서 조금 벗어나는 경우가 많다. 이러한 경우에 보통은 각 파라미터들을 미세 조정(tuning)하여 설계값과 일치하도록 한다. 위에서 설계한 안테나의 경우에도 실제 제작한 결과 중심 주파수가 고주파 쪽으로 조금 이동하는 것을

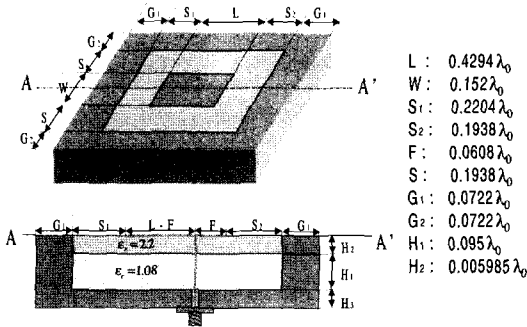


그림 4. 안테나 설계 파라미터
 Fig. 4. Antenna design parameters.

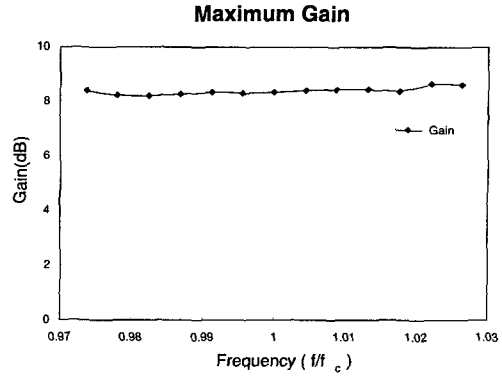


그림 6. 안테나의 측정 이득
 Fig. 6. Measured antenna gain.

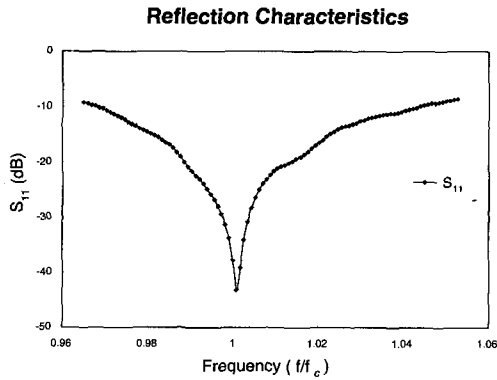


그림 5. 제작된 안테나의 측정 반사 계수
 Fig. 5. Measured reflection coefficient of the fabricated antenna.

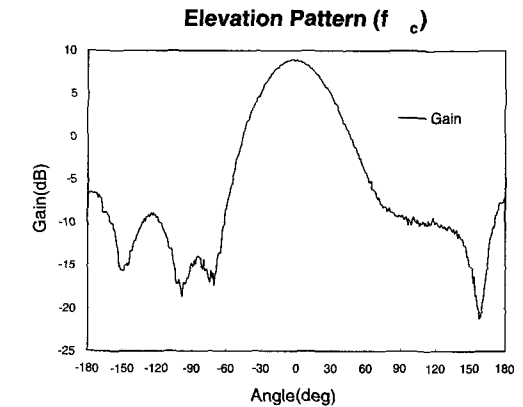
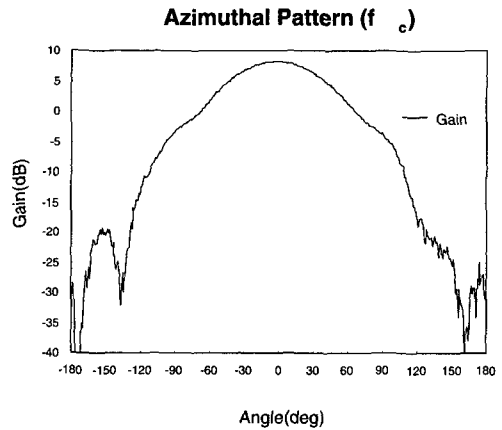


그림 7. 중심 주파수에서의 측정 빔 패턴
 Fig. 7. Measured beam pattern at the center frequency.

발견하였다. 여러 번의 Simulation 결과를 통해 급전 부분에서 패치의 끝단까지의 거리 중에 짧은 쪽의 길이를 조정하면, 매칭 특성과 대역폭에 거의 변화를 주지 않고 중심 주파수만 이동시킬 수 있음을 알 수 있었으므로, 동태이프를 사용하여 그림 4의 F의 길이를 조정함으로써, 제작한 안테나의 중심 주파수를 원하는 값에 정확히 맞출 수 있었다.

그림 5~그림 7에서는 이렇게 제작된 안테나의 측정 결과를 나타내었다.

그림 5와 그림 6에서 보듯이 안테나의 상대 대역폭은 7.46 % 정도로 충분히 원하는 대역폭을 맞출 수 있었고, 측정된 안테나의 이득도 각 주파수에서 8 dB 이상으로서, 초기 사양을 충분히 만족함을 알 수 있었다.

하지만 그림 7에서 보듯이 측정 패턴으로부터 얻

은 방위각과 고각의 빔폭은 중심 주파수에서 각각

79°와 52° 정도로 초기 사양에는 못 미치는 것으로 나타났다.

그러나, 위에서 언급하였듯이 안테나에 대한 초기 사양은, 전체 시스템에서 요구하는 탐지 거리와 탐지 확률을 만족시키기 위한 하나의 충분 조건으로 정해진 것이므로, 측정치가 초기 사양을 충분히 만족시키는가 보다는 측정치로부터 계산한 탐지 거리와 탐지 확률이 원하는 값을 만족시키는지 살펴보는 것이 더 중요하다. 따라서 본 논문의 다음 절에서는, 주어진 측정치로부터 탐지 거리와 탐지 확률을 구하는 과정과, 이렇게 계산된 결과가 원하는 수준을 만족시키는지의 여부를 보이도록 하겠다.

그러나, 처음 제작된 안테나의 빔폭이 일단 초기 사양에는 못 미쳤으므로, 이를 좀 더 개선하기 위해서 2차 안테나를 설계하고 제작하였다. 1차 제작한 안테나의 경우, 측정된 안테나 이득이 초기 사양에 비해 0.5~1.0 dB 정도의 여유가 있었으므로, 2차 제작 안테나는 안테나의 빔폭을 좀 더 증가시키고, 안테나 이득을 감소시키는 방향으로 설계하였다. 이를 위해 안타나 패치와 금속 공동의 폭을 더 줄이고, 이에 따른 대역폭 감소를 막기 위해 기판과 금속 공동 사이의 foam(또는 공기층)의 두께를 증가시켰다. 또한 접지면 역할을 하는 금속 공동면을 그림 8과 같은 형태로 가공하여, 안테나의 빔폭을 좁게 하기 위해 사용하는 corner reflector^[3]와 반대되는 기능을 할 수 있도록 하였다.

이렇게 제작한 안테나의 측정 결과를 그림 9~그림 11에서 1차 제작한 안테나의 측정 결과와 비교하였다.

그림 9에서 2차 제작한 안테나의 상대 대역폭은 4.91 % 정도로 초기 사양을 만족함을 알 수 있다. 또한 그림 10에서 보듯이 측정된 안테나의 이득은

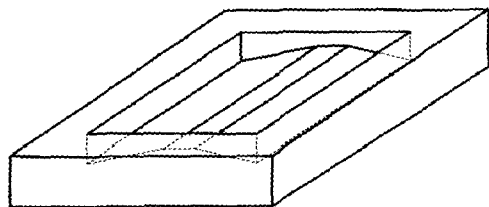


그림 8. 수정된 접지면을 가진 금속 공동
Fig. 8. Metal cavity with a modified ground plane.

Reflection Characteristics

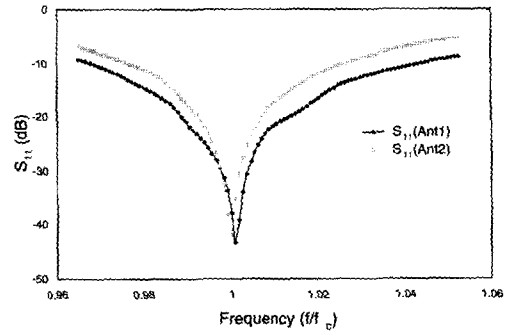


그림 9. 제작된 두 안테나의 측정 반사 계수 비교
Fig. 9. Comparison of the measured S_{11} between two fabricated antennas.

Maximum Gain

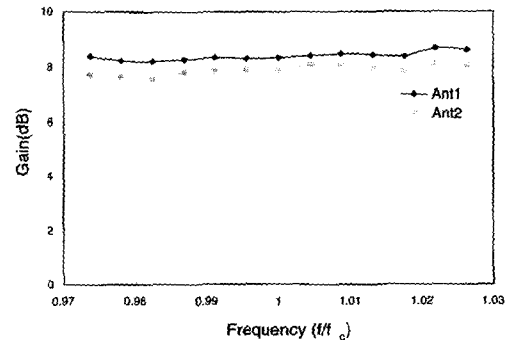


그림 10. 제작된 두 안테나의 측정 이득 비교
Fig. 10. Comparison of the measured gain between two fabricated antennas.

각 주파수에서 7.5 dB 이상으로서 초기 사양을 만족하기는 하지만, 처음 제작한 안테나의 이득에는 못 미침을 알 수 있다.

그러나 그림 11에서 측정 패턴으로부터 얻은 방위각과 고각의 빔폭은 중심 주파수에서 각각 84°와 55° 정도로 원하는 빔폭에 더 근접했음을 알 수 있다. 이렇게 2회 제작한 안테나의 측정 결과를 종합해 볼 때, 초기 사양을 만족시키기 위해 안테나의 빔폭을 더 넓히는 것은 의미가 없다는 것을 알 수 있다. 왜냐하면, 안테나의 빔폭을 더 넓히면 안테나의 이득이 더 감소하게 되는데, 2차 제작한 안테나의 경우 안테나 이득에 대한 여유분(margin)이 거의 없기 때문이다. 따라서 제작된 2종의 안테나가 주어

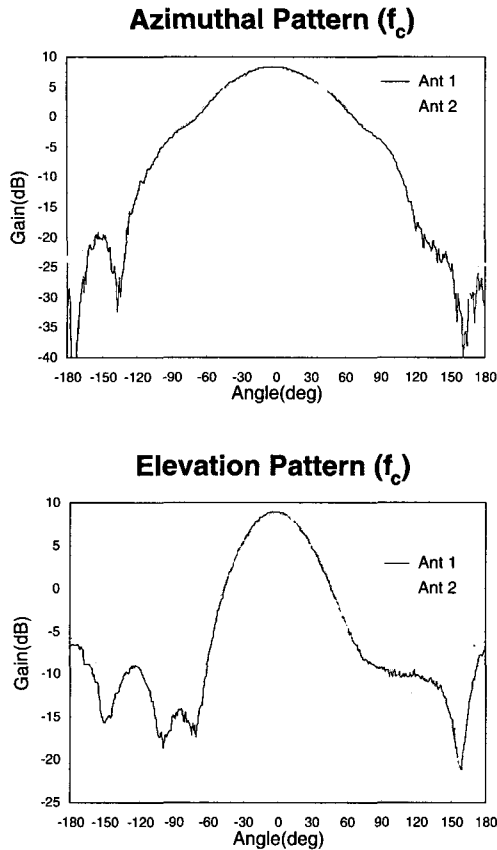


그림 11. 중심 주파수에서의 빔 패턴 비교
Fig. 11. Comparison of the measured beam patterns at the center frequency.

진 탐지 거리와 탐지 확률을 만족시킬 수 있는지의 여부가 중요한 것을 알 수 있다.

Ⅲ. 탐지 거리와 탐지 확률의 계산

주어진 레이더 시스템의 탐지 거리와 탐지 확률은 측정된 안테나의 이득과 패턴을 바탕으로 계산해 낼 수 있다. 물론 안테나 뒷단에 연결되는 송수신부와 신호처리부, 그리고 실제로 레이더 시스템이 운용되는 환경 등에 따라 탐지 거리와 탐지 확률의 계산은 많이 다르지만, 본 논문에서는 다른 모든 요소는 고정되어 있다고 가정하고, 원하는 탐지 거리와 탐지 확률을 만족시키면서 Gaussian 빔패턴과 초기 사양값을 가진 이상적인 안테나의 결과와 비교하여, 제작된 2종의 안테나가 얼마만큼의 탐지 거리

와 탐지 확률을 가지는지 계산하고자 한다.

먼저 그림 1에서와 같이 목표물이 임의의 방위각 θ 에 놓여 있다고 가정하고, 이상적인 안테나를 사용한 경우의 최대 탐지 거리를 R_{max}^{ref} , 방위각 θ 에서의 송신 안테나 이득을 G_{Tx}^{ref} , 방위각 θ 에서 두 개의 수신 안테나 중 이득이 큰쪽에서의 수신 안테나 이득을 G_{Rx}^{ref} 라 하자. 이 때 제작된 안테나에 대한 방위각 θ 에서의 송수신 이득을 각각 G_{Tx} , G_{Rx} 라 하면, 이 방위각에서의 최대 탐지 거리 R_{max} 는 다음과 같이 구할 수 있다^[4].

$$R_{max} = R_{max}^{ref} \left(\frac{G_{Tx} G_{Rx}}{G_{Tx}^{ref} G_{Rx}^{ref}} \right)^{1/4} \quad (2)$$

그림 12에서는 위 식을 이용하여, 이상적인 안테나와 제작된 두 종류의 안테나에 대한 최대 탐지 거리의 비(R_{max}/R_{max}^{ref})를 구하여 나타내었다.

그림 12에서 보듯이 원하는 방위각 영역 $-45^\circ \sim 45^\circ$ 사이에서, 제작된 두 안테나에 대해 계산된 최대 탐지 거리가 이상적인 안테나의 최대 탐지 거리보다 크기 때문에, 제작된 두 안테나가 모두 시스템 요구 사항을 잘 만족시킨다는 것을 알 수 있다.

한편, 레이더 시스템의 탐지 확률은 측정된 안테나 패턴으로부터 다음과 같은 과정을 통하여 계산할 수 있다. 먼저, 그림 1과 같이 목표물이 임의의

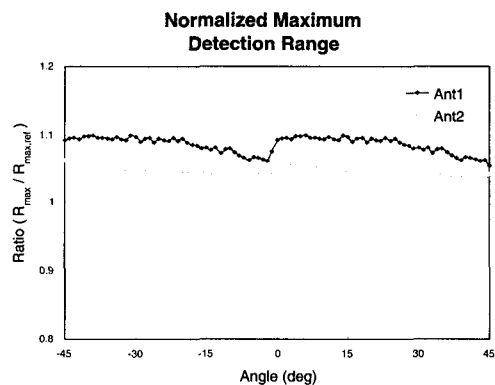


그림 12. 제작된 두 안테나를 사용했을 때의 최대 탐지 거리 비교
Fig. 12. Comparison of maximum detection ranges calculated from the measured beam patterns of two fabricated antennas.

방위각 θ 에 있을 때, 송신 안테나의 안테나 이득을 G_{θ}^{Tx} 라 하자. 이 때, 수신 안테나 1, 2에서의 안테나 이득은 각각 $G_{-45+\theta}^{Rx1}$, $G_{45+\theta}^{Rx2}$ 로 쓸 수 있다. 또한 두 수신 안테나의 SNR을 각각 SNR_{RX_1} 과 SNR_{RX_2} 라 하면 SNR_{RX_1} 과 SNR_{RX_2} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$SNR_{RX_1} = SNR_{ref} \times \frac{G_{\theta}^{Tx} G_{-45+\theta}^{Rx1}}{G_0^{Tx} G_{-45}^{Rx1}} \quad (3)$$

$$SNR_{RX_2} = SNR_{ref} \times \frac{G_{\theta}^{Tx} G_{45+\theta}^{Rx2}}{G_0^{Tx} G_{45}^{Rx2}} \quad (4)$$

위 식에서 SNR_{ref} 는 목표물이 각도 0° 에 있을 때 두 수신 안테나의 SNR이다. 이렇게 구한 각 수신 안테나의 SNR로부터, i 번째 수신 안테나의 탐지 확률 P_d^i 는 Swerling Case 1에 대해 다음과 같은 근사식으로 구할 수 있다^[5].

$$P_d^i = \exp\left(\frac{\ln P_{fa}}{a + b SNR_{RX_i}}\right) \quad (5)$$

여기서 P_{fa} 는 레이더 시스템에서 요구하는 오경보(false alarm) 확률이며, a 와 b 는 시스템에 따라 정해지는 상수이다. 그런데, 전체 레이더 시스템의 탐지 확률은 두 수신 안테나 중에서 어느 한 개의 안테나만 목표물을 탐지하면 되므로, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_d^{OR} = P_d^1 P_d^2 + P_d^1 (1 - P_d^2) + (1 - P_d^1) P_d^2 \quad (6)$$

식 (6)으로 부터 얻어낸 탐지 확률은 목표물을 탐지하는 레이더가 단 한 번의 관찰(single observation)을 통해 목표물의 존재를 판단한다는 가정에 근거를 두고 있다. 그러나 실제 레이더에서 단 한번의 관찰만을 통해서 목표물이 존재한다고 판단하는 경우는 거의 없으므로, 이를 보충하기 위한 하나의 판단 기준으로서 N 번의 관찰 중에 M 번 이상 목표물이 탐지될 확률을 계산하기도 한다^[4]. 이 확률을 식 (6)에서 주어진 P_d^{OR} 로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_d = \sum_{k=M}^N \frac{N!}{k!(N-k)!} (P_d^{OR})^k (1 - P_d^{OR})^{N-k} \quad (7)$$

본 논문에서는 $N=3$, $M=2$ 인 경우를 기준으로 탐

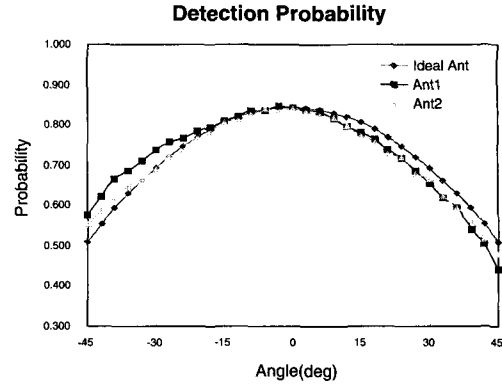


그림 13. 제작된 두 안테나를 사용했을 때의 탐지 확률 비교

Fig. 13. Comparison of detection probabilities calculated from the measured beam patterns of two fabricated antennas.

지 확률을 계산하여 그림 13에 나타내었다.

그림 13에서 안테나의 측정상의 약간의 오차 때문에, 최대 안테나 이득을 내는 위치가 약간 이동되어 있어서, 식 (7)로부터 구한 확률이 음수각 쪽으로 약간 이동되어 있는 것을 볼 수 있다. 이것을 고려한다면 그림 13에서 보는 바와 같이, 두 안테나 모두 $-45^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 전 영역에서 탐지 확률이 0.5이상 되는 것을 보장하여, 탐지 확률 면에서 이상적인 빔폭을 가지는 안테나에 결코 뒤지지 않는 것을 알 수 있다.

따라서 제작된 2종의 안테나 모두, 탐지 거리와 탐지 확률면에서 전체 레이더 시스템이 요구하는 사양을 잘 만족시키는 것을 알 수 있다.

IV. 맺음말

본 논문에서는 방위각 탐지 모노펄스 레이더용 cavity-backed 마이크로스트립 안테나를 설계, 제작하였다. 보통의 마이크로스트립 안테나와는 다르게 시스템에서 요구하는 방위각 빔폭이 고각 빔폭보다 넓으므로, 이를 위해 마이크로스트립 패치의 폭을 줄였고, 이에 따른 대역폭의 감소는 유효한 기관 두께를 증가시킴으로 보상하였다. 또한 접지면 역할을 하는 금속 공동면을 그림 8과 같은 형태로 가공하여, 방위각 빔폭을 조금 더 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 이렇게 제작된 안테나의 빔 패턴 측정 결

과로부터 탐지 거리와 탐지 확률을 계산하고, 이상적인 Gaussian 빔 패턴을 가진 안테나의 결과와 비교하여, 제작된 안테나가 전체 시스템에 잘 적용될 수 있음을 보였다.

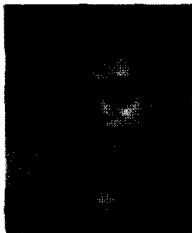
감사의 글

제작된 안테나의 패턴 측정을 도와 주신 (주)에이스 안테나의 김정식 과장님과 임기남 연구원님께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] K. F. Lee, W. Chen, *Advances in microstrip and printed antennas*, John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [2] J. D. Kraus, R. J. Marhefka, *Antennas for all applications*, McGraw-Hill, 3rd Ed., 2002.
- [3] C. A. Balanis, *Antennas Theory: Analysis and design*, John & Sons, 1982.
- [4] M. I. Skolnik, *Introduction to radar systems*, McGraw-Hill, 3rd Ed., 2001.
- [5] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, McGraw-Hill, 2nd Ed., 1990.

박 종 국



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 서울대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 2001년 8월: 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
 2001년 11월~현재: LG 이노텍 연구소 전문화그룹 선임연구원

[주 관심분야] 전자파 수치해석, 안테나 설계, 마이크로파 및 밀리미터파 수동회로 설계 및 해석

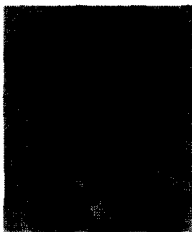
구 연 덕



1977년 3월: 육사 전기공학 (공학사)
 1985년 12월: 미 해군대학원 물리학 (이학석사)
 1990년 8월: 미 텍사스공대 (공학박사)
 1991년 12월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 레이저 시스템 및 안테나 개발

나 형 기



1991년 2월: 포항 공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1993년 2월: 포항 공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1996년 2월: 포항 공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 1996년 1월~현재: LG 이노텍 연구소 전문화그룹 책임연구원

[주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

이 종 민



1985년 2월: 경희대학교 물리학과 (이학사)
 1988년 2월: 경희대학원 물리학과 (이학석사)
 1991년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이저 시스템 및 안테나 개발