

## GBAS용 3중 폴디드 무지향성 마이크로스트립 안테나

## Triple Folded Omnidirectional Microstrip Antenna for GBAS

주 대 근\* · 우 종 명\*\*

\* 주저자 : 충남대학교 전파정보통신공학과 박사과정

\*\* 교신저자 : 충남대학교 전파정보통신공학과 교수

Dae-Keun Ju\* · Jong-Myung Woo\*\*

\* Dept. of Radio and Information Communications Engineering Univ. of Chungnam

\*\* Dept. of Radio and Information Communications Engineering Univ. of Chungnam

† Corresponding author : Jong-Myung Woo, jmwoo@cnu.ac.kr

Vol.20 No.4(2021)

August, 2021  
pp.83~94pISSN 1738-0774  
eISSN 2384-1729  
<https://doi.org/10.12815/kits.2021.20.4.83>Received 22 July 2021  
Revised 5 August 2021  
Accepted 10 August 2021© 2021. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

## 요 약

본 논문에서는 GBAS의 VDB 시스템에 사용되는 4각 배열 다이폴 안테나를 하나의 안테나로 대체할 수 있는 3중 폴디드 무지향성 마이크로스트립 안테나(중심주파수 118 MHz)를 제안하였다. 먼저  $\lambda/2$  마이크로스트립 안테나에서 무지향성 방사 패턴을 얻기 위해  $\lambda/4$ 로 폴디드된 안테나를 제작하였으며, 또한 섭동 효과를 이용하여 3중 폴디드 형태의 소형화된 안테나로 변형시켰다. 그 결과, 중심주파수 118MHz 대역에서  $S_{11}$ 은  $-13.91$  dB,  $-10$  dB 대역폭은 1.5 MHz(1.27%)의 특성을 얻었다. 또한, yz-plane, xy-plane에서  $E_{\theta}$  성분이 전방향성 방사 패턴을 나타내며, 안테나의 크기는 기준안테나 대비 64.2% 소형화를 얻어, 최종적으로 제안된 하나의 안테나로써 GBAS의 VDB용 안테나로써 적합함을 확인하였다.

핵심어 : GBAS, VDB 안테나, 접은 안테나, 무지향성, 섭동 효과

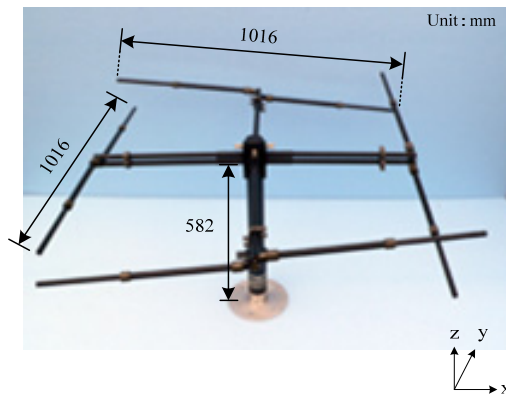
## ABSTRACT

In this paper, we proposed a microstrip antenna (center frequency 118 MHz) with an omnidirectional radiation pattern that can replace the antennae used in VDB systems in GBAS. First, to obtain an omnidirectional radiation pattern from a microstrip antenna, we constructed a folded antenna. We then designed a miniaturized triple-folded antenna using perturbation effects. Thus we obtained suitable characteristics with a  $S_{11}$  of  $-13.91$ dB,  $-10$  dB bandwidth of 1.5 MHz (1.27%) in the center frequency of 118 MHz. Furthermore, in the yz-plane and xy-plane, the component exhibits an omnidirectional radiation pattern, and the size of the antenna achieves miniaturization of 64.2% compared to the reference antenna. Finally, it is suitable as an antenna for VDB systems in GBAS.

Key words : GBAS, VDB antenna, Folded antenna, Omnidirection, Perturbation effect

## I. 서 론

최근 지속적으로 증가하고 있는 항공운항 수요의 효율성 향상과 안전성을 위해 국제민간항공기구(ICAO: International Civil Aviation Organization)에서는 기존 계기비행 및 착륙을 위한 지상항행시설(VOR : VHF Omnidirectional Range, ILS : Instrument Landing System 등)을 대신해 항공기 운항에 위성항법시스템(GNSS : Global Navigation Satellite System)의 도입을 권고하였다. 그러나 위성의 오차로 발생하는 부정확한 위치정보 제공으로 항공운항에서 위성항법시스템의 단독 활용은 불가능하다. 따라서 위치정보를 보정해주는 위성항법 보강시스템(Augmentation System)이 함께 이용되어 진다. 이러한 보강시스템의 종류는 지상의 고정된 위치에서 제한된 지역을 보정하는 지상기반보강시스템(GBAS : Ground Based Augmentation System)과 정지궤도 위성을 활용한 넓은 지역을 보정하는 위성기반보강시스템(SBAS : Satellite Based Management System), 항공기를 이용한(ABAS : Airborne Augmentation System)등이 있다(Bae et al., 2011). 특히 GBAS는 항공기의 공항 접근과 착륙서비스에 이용되며 위성으로부터 수신되는 신호의 오차를 지상의 기준위치를 이용하여 보정하고 정확한 위치정보 및 오동작 여부를 항공기에 제공하는 시스템으로 GPS 정보를 수신하는 기준국 수신기, 위치보정 정보를 계산하는 프로세서, 보정 정보를 항공기에 송신하는 지상시스템(VDB : VHF Data Broadcast)으로 구성되어 있다(dB Systems Inc.).



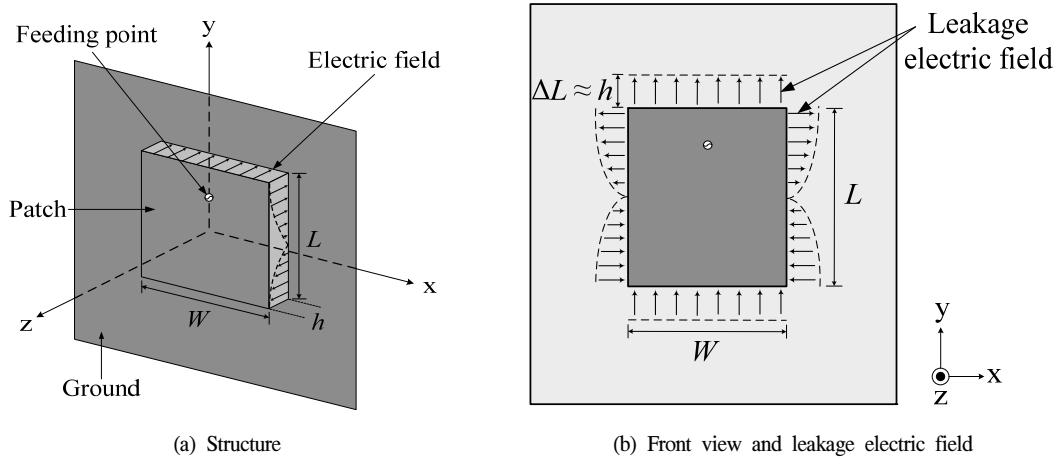
<Fig. 1> Conventional square array dipole antenna used in VDB of GBAS.

<Fig. 1>에 나타낸 바와 같이 일반적으로 GBAS의 VDB 송수신용으로 사용되는 안테나는 선형 편파를 갖는 다이폴 안테나의 4각 배열 구조이다. 그러나 기존 배열된 다이폴 안테나의 구조는 동일 급전시 급전구조의 복잡성, 안테나간 공간위상차에 의한 수평면상의 방사레벨 저하, 서로 직교하는 합성패턴에 의한 타원방사패턴 형성 등의 단점이 있으며 또한 각 배열 소자의 길이가 1016 mm(중심주파수 : 118 MHz)로 상대적으로 큰 크기로 인해 강풍 등 주변 환경에 대한 영향이 크다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위한 단일 안테나로 GBAS의 지상시스템인 VDB에 적합한 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 하나의 안테나에 단일급전으로 E-plane, H-plane에서 무지향성 방사패턴을 확보하기 위해, 먼저  $\lambda/2$  마이크로스트립 안테나를  $\lambda/4$ 로 폴디드시켰으며, 다음으로 안테나의 물리적 크기를 소형화시키기 위해 섭동 효과를 이용하여 소형화한 3중 폴디드 구조로 설계하였다. 이들 설계과정 및 결과들에 대해 기술하고자 한다.

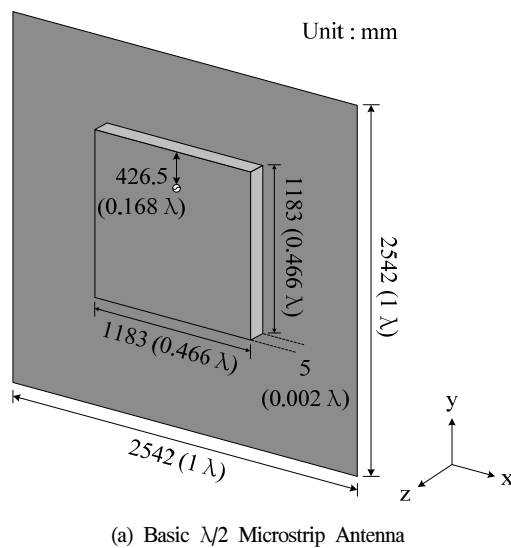
## II. 본 론

### 1. 기본형 $\lambda/2$ 마이크로스트립 패치 안테나

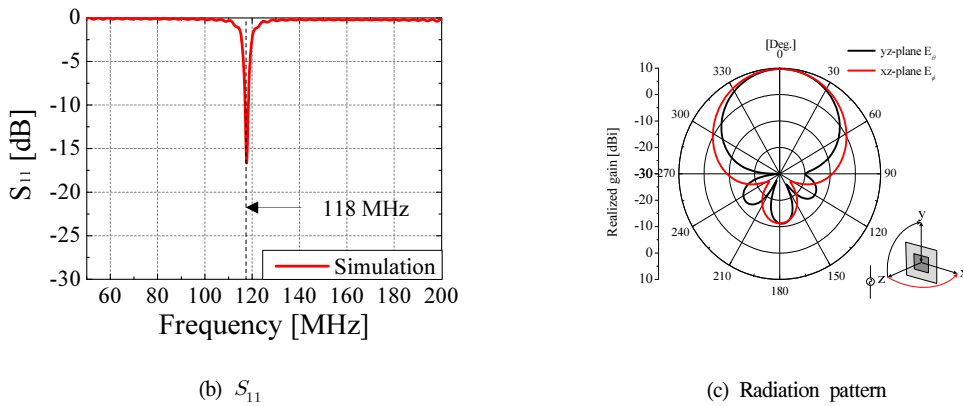


<Fig. 2> Schematic illustrations of the  $\lambda/2$  microstrip antenna structure and mode.

<Fig. 2(a)>는 기본적인  $\lambda/2$ (중심주파수 : 118 MHz,  $\lambda$ :파장 : 2542 mm) 마이크로스트립 패치 안테나의 구조 및 누설 전계를 나타내고 있다. 방사 소자 길이  $L$ 과 폭  $W$ 는  $\lambda/2$ 에 가깝게 설정할 수 있다.  $h$ 는 유전체와 패치면의 높이를 나타내고 있으며, 이때 캐비티 모델 내에는  $TM_{010}^c$  모드로 설정되었다. <Fig. 2(b)>에는 접지면이 방사 소자보다 큰 경우 평면도 상의 누설 전계 분포를 나타내고 있으며, 누설 전계 길이  $\Delta L$ 은 패치의 높이와 유사하다고 상정된다. 여기서 좌우에 분포되어 있는 수평 편파는 역위상으로 서로 상쇄되고, 상하에 분포되어 있는 수직 편파가 동위상으로 방사에 기여하게 된다(Balanis, 2005; Carver and Mink, 1981).



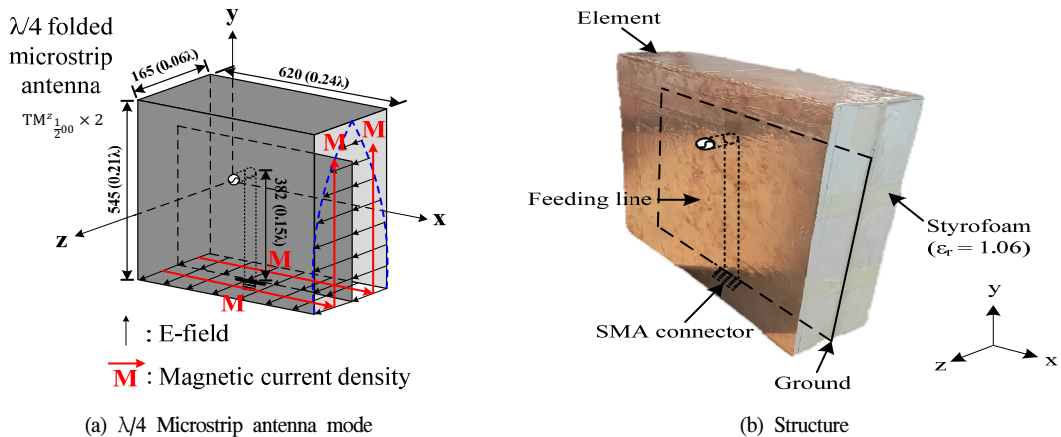
(a) Basic  $\lambda/2$  Microstrip Antenna

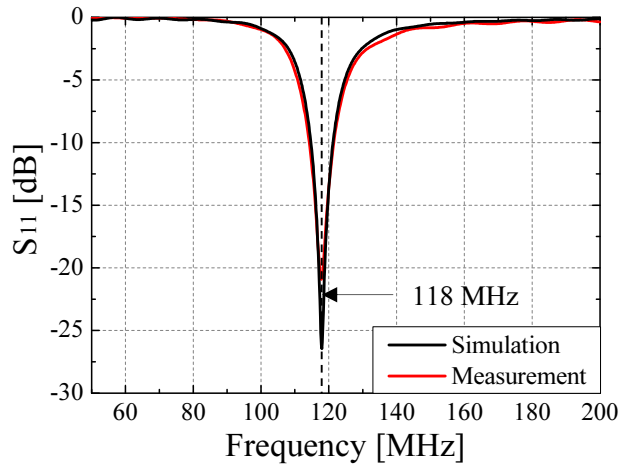


<Fig. 3> Characteristic of basic  $\lambda/2$  microstrip antenna (simulation)

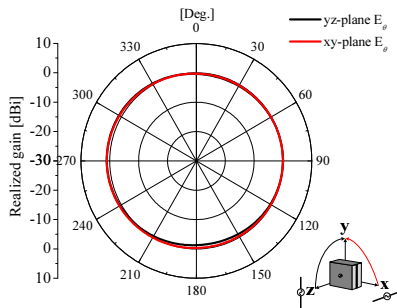
이와 같은 구조의 안테나로 GBAS(Ground Based Augmentation System)의 중심주파수 118 MHz에서 실제 설계 시뮬레이션하였다. 급전은 프로브 급전을 채택하였고 유전체는 스티로폼을 이용하여 공기와 유사하게 하였으며, 설계 치수 및 특성을 <Fig. 3>에 나타냈다. 접지면 크기는  $1\lambda \times 1\lambda$ 로 설정하였으며, 시뮬레이션 결과  $S_{11}$ 은 -16.7 dB이고, 방사 패턴의 경우 y축 평행 편파에 대해 브로드사이드 방사 특성을 나타냈다. -10 dB 대역폭은 1.4 MHz(1.1%), 최대 이득은 9.7 dBi, 빔 폭은 E-plane에서  $60^\circ$ , H-plane에서  $66^\circ$ 의 값을 얻었다. 이때 x축 평행 편파는 급전점이 수평축 상의 중앙에 위치하고 있어 임피던스 매칭이 되지 않아 반사손실이 크며 또한, 수직 급전에 의한 수평 편파는 위상이 상호 반대가 되어 서로 상쇄된다. 이와 같이 수직 편파가 방사에 기여하게 되고 수평 편파에서는 방사 패턴을 얻기 어렵다.

## 2. $\lambda/4$ 폴디드 마이크로스트립 안테나 설계

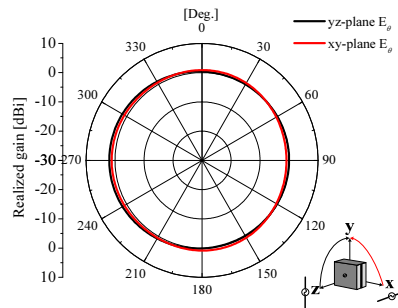




(c)  $S_{11}$



(d) Radiation pattern (simulation)



(e) Radiation pattern (measurement)

<Fig. 4> Characteristic of basic  $\lambda/4$  microstrip antenna

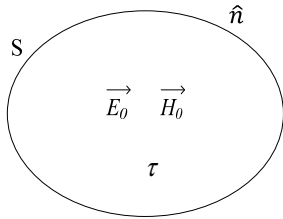
E-plane 브로드사이드 방사 패턴을 무지향성으로 변형시키기 위해 <Fig. 4(a)>에 나타난 바와 같이 <Fig. 2(a)>의  $\lambda/2$  안테나의  $y$ 축 방사 소자 길이  $L$ 을  $\lambda/4$ 가 되도록 폴디드시켰다(Moon et al., 2011). 또한, 접지면의 크기를 방사 소자 크기와 같게 하였다. 이에 따라 개구면 상의 자기적 전류 밀도  $M$ 이 동위상이 되어  $y$ 축 상의 전계 분포가  $xy$ -plane에서도 방사에 기여하게 된다. 급전은 <Fig. 4(b)>에 나타난 바와 같이 접지면과 마이크로스트립 라인을 중간에 삽입시킨 구조로 채택하였다. 시뮬레이션과 실제 제작으로, 그 특성을 측정된 결과  $S_{11}$ 은 각각  $-26.29$  dB,  $-22.36$  dB를 얻었고, 방사 패턴은  $yz$ -plane과  $xy$ -plane에서  $E_{\theta}$  성분 모두 무지향성 특성이 나타났으며, 시뮬레이션 결과  $yz$ -plane에서 최대 이득은  $1.03$  dBi, 최소 이득은  $-1.34$  dBi,  $xy$ -plane에서 최대 이득은  $1$  dBi, 최소 이득은  $-0.38$  dBi이고, 측정 결과  $yz$ -plane에서 최대 이득은  $1.96$  dBi, 최소 이득은  $-0.22$  dBi,  $xy$ -plane에서 최대 이득은  $1.15$  dBi, 최소 이득은  $-0.88$  dBi이다. 따라서 2개 면에서 무지향성 방사 패턴 특성을 얻어 기존 4개의 다이폴 4각 배열의 GBAS의 VDB 시스템용 안테나를 1개의 안테나로 대체가 가능함을 확인하였다.

이에 제작된 안테나를 더욱 소형화시켜 바람 등 외부환경에 최적화된 GBAS의 VDB 시스템용 안테나로 활용되기 위해 섭동 효과(perturbation effect)를 이용하여 안테나를 소형화시키고자 하였다(Carver and Mink, 1981).

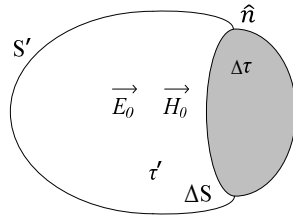
### 3. 2중 폴디드 무지향성 마이크로스트립 안테나 설계

$$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \approx \frac{\iiint_{\Delta\tau} (\mu |\vec{H}_0|^2 - \epsilon |\vec{E}_0|^2) d\tau}{\iiint_{\tau} (\mu |\vec{H}_0|^2 + \epsilon |\vec{E}_0|^2) d\tau} \dots\dots\dots (1)$$

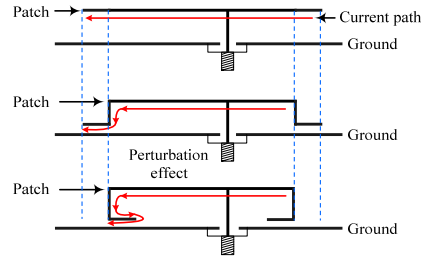
$\omega_0$ : 원형 공진기의 공진주파수,  $\omega$ : 변형된 공진기의 공진주파수,  $\epsilon$ : 유전율,  $\mu$ : 투자율,  $\tau$ : 체적,  $\Delta\tau$ : 변형된 공진기의 체적,  $\vec{H}_0$ : 기존 자계 에너지,  $\vec{E}_0$ : 기존 전계 에너지



(a) Original metal cavity



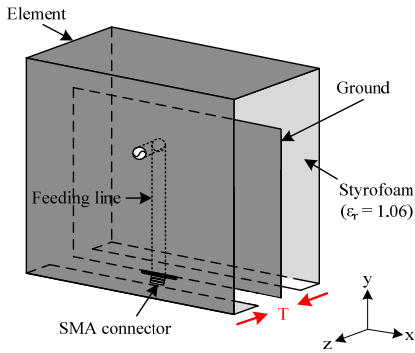
(b) Perturbed metal cavity



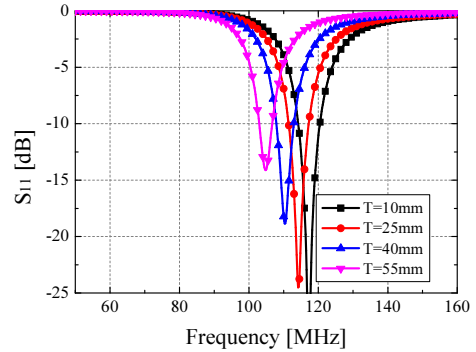
(c) Microstrip antenna with perturbation effect

<Fig. 5> Perturbation effect

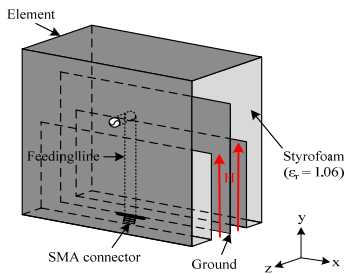
다음은 앞서 제안된  $\lambda/4$  폴디드 마이크로스트립 안테나를 섭동 효과를 이용하여 소형화하고자 하였다. 섭동 효과는 도체 공진기의 체적이나 구조의 변형에 의해 공진주파수가 변하는 원리로서, 그 특성을 설명하기 위해 <Fig. 5(a)>와 (b)에 일반적인 도체 공진기와 변형된 도체 공진기의 구조와 각 내부에서 정의되는 전자계를 나타냈다. 이때 각 공진기 내부에서의 전계, 자계 에너지를 주파수에 관한 식으로 정리하면 식 (1)과 같은 식이 된다(Pozar, 1998). 식 (1)에서 우변의 분모는 도체 공진기의 체적  $\tau$  내의 총 에너지를 나타내고, 분자는 변형된 도체 공진기의 체적  $\Delta\tau$  내의 에너지를 나타낸다. 따라서 식 (1)에 의해 섭동 효과에 의한 공진주파수를 하향시키기 위해서는 좌변의 분자  $\omega - \omega_0$ 가 음수가 되어야 하므로 우변의 분자  $\iiint_{\Delta\tau} (\mu |\vec{H}_0|^2 - \epsilon |\vec{E}_0|^2) d\tau$ 도 음수가 되어야 한다. 즉 우변의 식에서 전계 에너지가 체적 감소 변화가 클 때 섭동 효과에 의한 공진주파수가 하향됨을 알 수 있다. 따라서 <Fig. 5(c)>에 나타난 바와 같이  $\lambda/2$  마이크로스트립 패치 안테나를 소형화시키기 위해 전계 에너지가 가장 강한 부분인 패치면의 양 끝단의 구조를 평면구조로부터 “L”자 형태로 눌러 전계 에너지의 체적을 줄이고, 다음 “ㄷ”자 형태로 눌러진 패치 끝단을 안으로 접어 들이는 구조로 변형시켜 전계 에너지 체적 감소 변화를 최대화시킴으로써  $\lambda/2$  마이크로스트립 안테나의 공진주파수를 하향시키고, 이는 동일 공진주파수에서 안테나의 크기를 소형화 할 수 있음을 의미한다. 따라서 이와같은 원리를  $\lambda/4$  폴디드 마이크로스트립 안테나에 적용시켜 그 크기를 더 소형화시키고자 하였다.



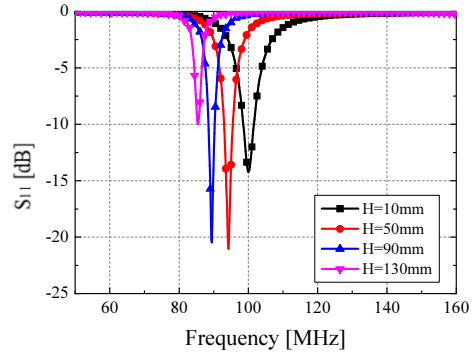
(a) Parameter 'T' variation



(b)  $S_{11}$



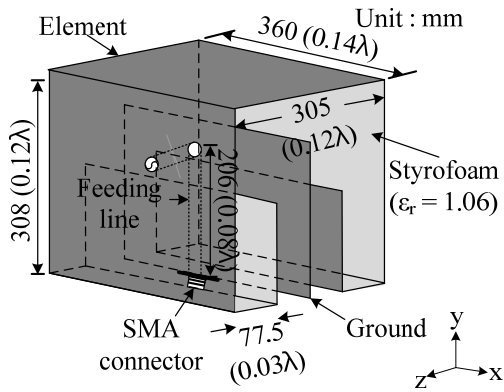
(c) Parameter 'H' variation



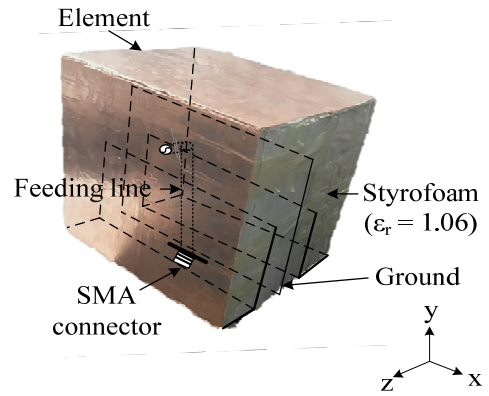
(d)  $S_{11}$

<Fig. 6> Frequency shift due to perturbation effect

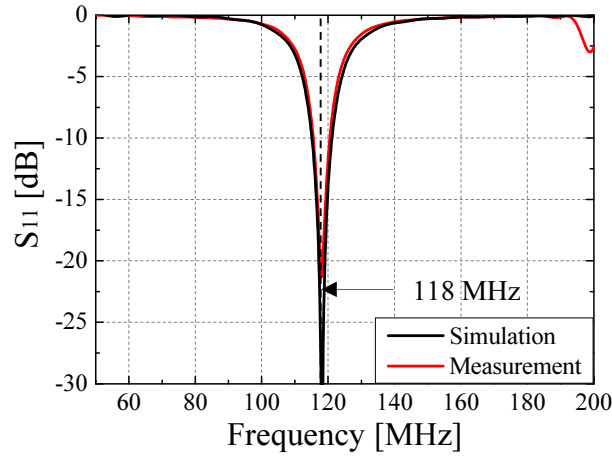
<Fig. 6>에는  $\lambda/4$  폴디드 마이크로스트립 안테나에서 시뮬레이션을 통해 안테나 양끝단을 접어 내린 길이 T의 변화에 대한 공진주파수 변화 특성을 나타냈다. 예로 길이 T를 10 mm에서 55 mm까지 변화시켰을시  $S_{11}$  특성을 <Fig. 6(b)>에 나타냈다. T의 길이가 길어질수록 공진주파수가 하향되는 특성을 나타내고 있으며, 이는 T가 길수록 전계 에너지 체적을 감소시키는 효과에 의해 나타나는 특성을 보여주고 있다. <Fig. 6(d)>에는 폴디드된 안테나에서 접지면 안쪽으로 한 번 더 폴디드된 길이 H가 10 mm에서 130 mm까지 길이 변화에 따른 공진주파수의 변화 특성을 나타냈다. 그림에 나타난 바와 같이 폴디드된 길이 T는 77.5 mm로 고정하고, 안쪽으로의 폴디드 되는 길이 H가 10 mm일 때 공진주파수 100 MHz에서 H가 130 mm일 때 공진주파수가 86 MHz까지 하향되었다. 이러한 주파수 하향 특성은 설정된 공진주파수의 안테나 크기가 소형화됨을 의미한다. 따라서, 이 결과들로부터 안테나의 방사 소자면 개구 끝부분의 폴디드 길이와 안쪽으로 접어들면 변화로부터 안테나의 방사 소자 크기를 소형화시킬 수 있음을 알 수 있다. 안테나의 폴디드 변수 T, H의 최적화된 길이를 시뮬레이션으로부터 중심주파수 118 MHz에 동작하는 2중 폴디드된 안테나의 구조를 설계하였다(Choi, 2020).



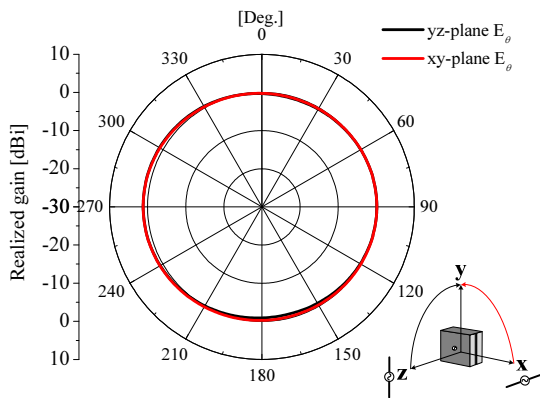
(a) Antenna structure (simulation)



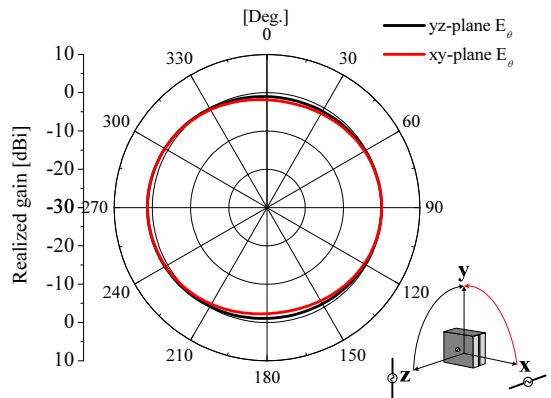
(b) Antenna structure (fabrication)



(c)  $S_{11}$

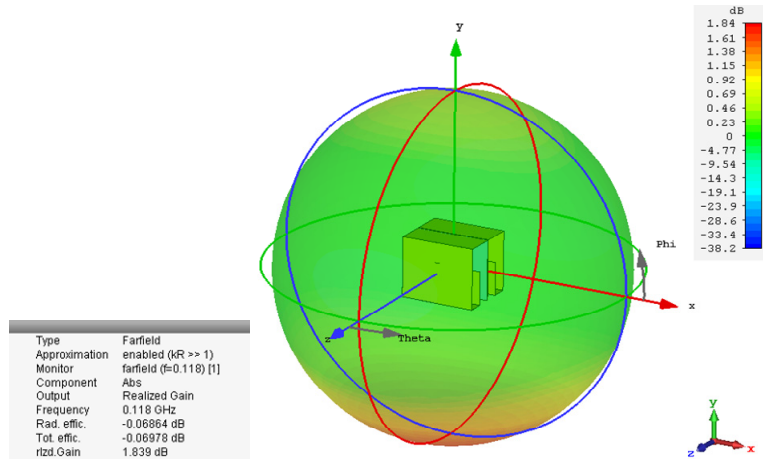


(d) Radiation pattern (simulation)



(e) Radiation pattern (measurement)





(f) 3D Radiation pattern (simulation)

<Fig. 7>  $\lambda/4$  double Folded microstrip antenna

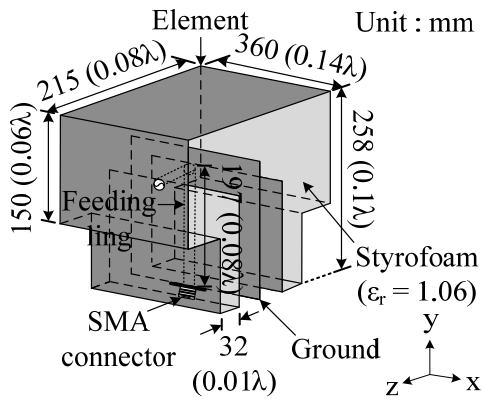
<Fig. 7>에는 제안된 2중 폴디드  $\lambda/4$  마이크로스트립 안테나의 구조 및  $S_{11}$ 과 방사 특성을 나타냈다. 시뮬레이션과 실제 제작으로부터 측정 결과  $S_{11}$ 은 각각 -38.82 dB, -21.28 dB의 양호한 입력임피던스 매칭 특성을 얻었다. 또한, 방사 패턴은 기존  $\lambda/4$  마이크로스트립 안테나와 동일하게  $yz$ -plane의  $E_\theta$  성분(E-plane),  $xy$ -plane의  $E_\phi$  성분(H-plane)이 무지향성을 갖는 방사 패턴을 형성하였다. 이때 제안된 안테나의 방사 소자 크기는  $360 \text{ mm}(0.14\lambda) \times 308 \text{ mm}(0.12\lambda) \times 305 \text{ mm}(0.12\lambda)$ 로  $\lambda/4$  폴디드 마이크로스트립 안테나의 크기와 비교하였을 때 39.3% 소형화되었다.

#### 4. GBAS용 3중 폴디드 무지향성 마이크로스트립 안테나

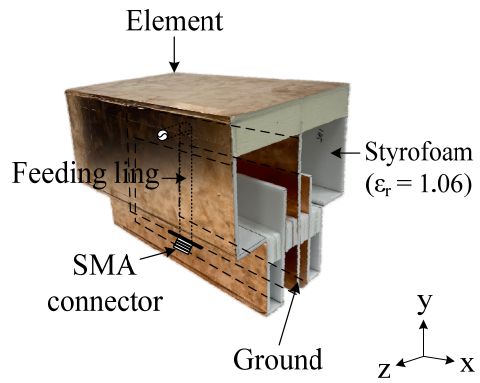
앞서 설계된 2중 폴디드 마이크로스트립 안테나를 더욱 소형화시킴으로써 GBAS에서의 활용 가능성을 높이기 위해 최종적으로 3중 폴디드 마이크로스트립 안테나를 설계하였다. 섭동 효과를 이용하여 기존 2중 폴디드 마이크로스트립 안테나의 구조에서 전계 에너지가 강한 개구쪽을 한 번 더 눌러 체적을 감소시키고 상대적으로 자계 에너지가 강한 안테나 중심부의 체적을 증가시키는 효과에 의해 그 크기를 더욱 소형화시켰다. 시뮬레이션을 통해 최적화된 안테나를 설계하였다. 그 결과 안테나의 크기는  $360 \text{ mm}(0.14\lambda) \times 258 \text{ mm}(0.1\lambda) \times 215 \text{ mm}(0.08\lambda)$ 로  $\lambda/4$  폴디드 마이크로스트립 안테나의 크기와 비교하였을 때 64.2% 소형화되었으며, 안테나의 소형화에 따른 특성 변화를 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> Characteristic according to the miniaturization of the antenna

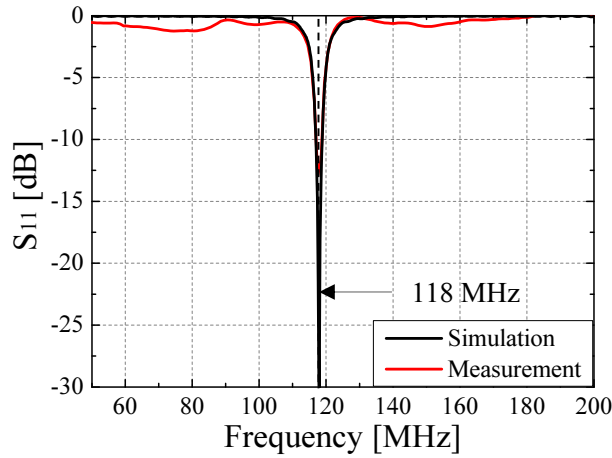
	$\lambda/4$ folded antenna		$\lambda/4$ double folded antenna		$\lambda/4$ triple folded antenna	
	yz-plane	xy-plane	yz-plane	xy-plane	yz-plane	xy-plane
Average gain [dBi] (measurement)	0.61	0.44	-0.07	0.18	-3.96	-4.35
Miniaturization rate [%]	-		39.3		64.2	
Efficiency [%] (simulation)	93.6		98.4		96.3	



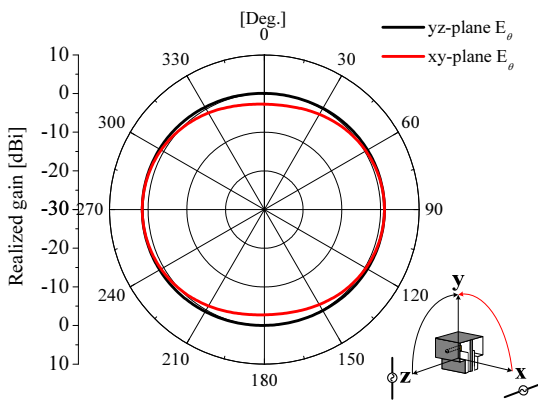
(a) Antenna structure (simulation)



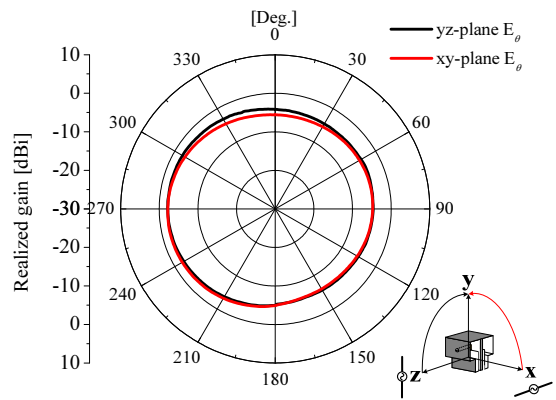
(b) Antenna structure (fabrication)



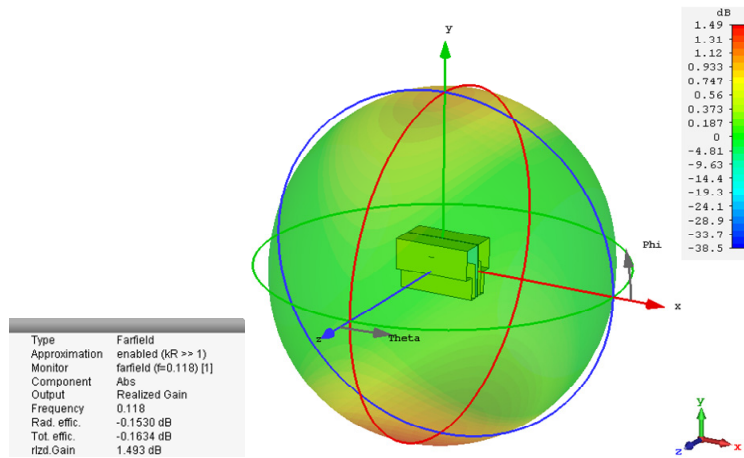
(c)  $S_{11}$



(d) Radiation pattern (simulation)



(e) Radiation pattern (measurement)



(f) 3D Radiation pattern (simulation)

<Fig. 8>  $\lambda/4$  Triple folded microstrip antenna

<Fig. 8>에는 최종적으로 제안된 GBAS용 3중 폴디드 무지향성 마이크로스트립 안테나의 구조 및  $s_{11}$  과 방사 특성을 나타냈다. 시뮬레이션과 실제 제작을 통한 측정 결과  $s_{11}$  은 각각 -28.30 dB, -13.91 dB를 얻었다. 방사 패턴은 2중 폴디드 마이크로스트립 안테나와 동일하게  $yz$ -plane에서  $E_{\theta}$  성분(E-plane),  $xy$ -plane에서  $E_{\phi}$  성분(H-plane)에서 무지향성을 갖는 방사 패턴을 형성하였고, 한편  $xy$ -plane의  $0^{\circ}$ 와  $180^{\circ}$ 에서 레벨이 조금 낮아 타원 모양의 패턴이 되는 것은  $xy$ -plane에서의 개구 분포가 코사인 분포로써 폴디드 구조에 의한 내부의 방사 소자와 접지면에 의한 전계 벡터로 일부분이 상쇄되어 측정치의 경우 1.7 dB의 레벨 차이가 있으나, null 점이 없는 무지향성에 가까운 패턴 특성을 얻어 GBAS 시스템 운용에는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다. 기존의 상용 안테나 대비 제안된 안테나의 특성을 <Table 2>에 비교 분석하였다

<Table 2> Characteristic of standard and proposed antenna

	Standard antenna	Proposed antenna	
Number of omnidirectional radiation pattern	Single	Double (yz-plane, xy-plane)	
Average gain [dBi] (measurement)	-5	yz-plane	xy-plane
		-3.96	-4.35

### III. 결 론

본 논문에서는 기존 GBAS 시스템에 사용되는 VDB 안테나를 대체할 수 있는 3중 폴디드 무지향성 마이크로스트립 안테나를 설계하였다. 기존의  $\lambda/2$  마이크로스트립 패치 안테나에서 무지향성 방사 패턴을 형성하기 위해  $\lambda/4$  폴디드 마이크로스트립 안테나를 설계하였으며, 이를 소형화시키기 위해 섭동 효과를 이용하여 2중 폴디드 마이크로스트립 안테나를 제작하였으며, 최종적으로 GBAS용 안테나를 위해 기존의 2중 폴디드 안테나의 섭동 효과를 이용하여 개구 가장자리 부분을 변형시켜 폴드시킴으로써 3중 폴디드 무지향성 마

이 마이크로스트립 안테나를 제안하였다. 그 결과 안테나의 크기는  $360 \text{ mm}(0.14\lambda) \times 258 \text{ mm}(0.1\lambda) \times 215 \text{ mm}(0.08\lambda)$ 로  $\lambda/4$  폴디드 마이크로스트립 안테나의 크기와 비교하였을 때 64.2% 소형화되었으며, 실제 제작된 안테나의 특성은 중심주파수 118 MHz에서  $S_{11}$ 은 -13.91 dB, -10 dB 대역폭은 1.5 MHz이고 방사 패턴은 무지향성 특성을 나타내고 있어 GBAS 시스템에 사용되는 기존 4각 배열 다이폴 VDB 안테나를 하나의 안테나로 대체 가능성을 확인하였다.

## REFERENCES

- Bae J. W., Jeon H. S., Kim D. M. and Yeom C. H.(2011), "Ground Based Augmentation System (GBAS) technology development and construction trend," *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 9, no. 2, pp.187-195.
- Balanis C. A.(2005), *Antenna Theory: Analysis and Design* (2nd ed.), Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, pp.771-829.
- Carver K. R. and Mink J. W.(1981), "Microstrip antenna technology," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 29, no. 1, pp.2-24.
- Choi D. S., Choi Y. S., Ju D. K. and Woo J. M.(2020), "Double folded omnidirectional microstrip antenna for GBAS," *In Proceedings of KIEES Summer Microwave and Propagation Conference*, vol. 8, no. 1, p.116.
- dB Systems Inc., VDB antenna, Single element, Foldable model. dBs 130, *Specification sheet*.
- Moon S. M., Ryu H. K. and Woo J. M.(2011), "Miniaturisation of  $\lambda/4$  microstrip antenna using perturbation effect and plate loading for low-VHF-band applications," *IEE Electronics Letter*, pp.162-164.
- Pozar(1998), *Microwave Engineering* (2nd ed.), Wiley, pp.340-346.