

낮은 부엽준위를 위한 밀리미터파 대역 마이크로스트립 콤라인 배열안테나

mmWave Band Microstrip Comb-Line Array Antenna for a Low Sidelobe Level

이 상 훈 · 이 재 호* · 서 동 욱

Sang-Hoon Lee · Jae-Ho Lee* · Dong-Wook Seo

요 약

밀리미터파 대역 차량용 레이더 안테나는 두께가 얇고, 제작이 쉽고, 저렴한 마이크로스트립 배열안테나가 주로 사용되고 있다. 다양한 구조의 마이크로스트립 배열안테나 중 마이크로스트립 콤라인 배열안테나는 손실이 작고 좁은 공간에 많은 방사소자를 배열할 수 있다는 장점이 있어 최근 많이 사용되고 있다. 하지만 기존 콤라인 배열안테나의 스텝형 방사소자만을 이용하여 밀리미터파 대역에서 요구되는 낮은 부엽준위를 달성하는 것은 여전히 어려운 경우가 대부분이다. 본 논문은 콤라인 배열안테나의 부엽준위를 낮추기 위해 급전선과 방사소자의 연결부 폭이 일정한 콤라인 방사소자를 제안하고, 기존의 방사소자와 제안한 방사소자로 구성된 1×17 배열안테나를 -20 dB 부엽준위를 가지는 테일러 가중치 분포를 적용하여 설계하였다. 제작된 안테나의 측정된 이득이 15.3 dBi이고, 부엽준위는 -21.5 dB로 설계 조건을 만족하였다.

Abstract

Microstrip array antennas are used in mmWave band automotive radar applications owing to their advantages of low costs, a low profile, and ease of manufacture. Among the various structures of microstrip array antennas, microstrip comb-line array antennas have recently been used extensively, as several radiating elements can be arranged in a small space with a low loss compared to other structures. However, it is difficult to achieve the low sidelobe level(SLL) required in the mmWave band using only conventional stub-type radiating elements. In this paper, we propose a comb-line array antenna that consists of radiating elements with a constant connection width between the feeding line and the radiating element to reduce the SLL. We designed a 1×17 array antenna composed of the conventional and proposed radiating elements by applying a Taylor distribution with an SLL of -20 dB. The measured results of the prototype antenna, with a measured gain of 15.3 dBi and an SLL of -21.5 dB, satisfied the design objective.

Key words: Array Antenna, Automotive Radar, Comb-Line Antenna, Microstrip Antenna, mmWave

†이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1C1B6003854).

‡본 연구는 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었음.[20ZD1130, 대경권 지역산업 기반 ICT융합기술 고도화 지원사업(이동체)].

한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime & Ocean University)

*한국전자통신연구원(Electronics Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received May 6, 2020 ; Revised June 9, 2020 ; Accepted July 23, 2020. (ID No. 20200506-041)

· Corresponding Author: Dong-Wook Seo (e-mail: dwseo@kmou.ac.kr)

I. 서론

레이다 시스템은 주로 군용으로 밀리미터파 대역에서 개발됐지만, 최근 차량용 레이다를 중심으로 민수용으로 발전 확대되고 있다. 주파수 측면에서 차량용 레이다는 초기 76~77 GHz (1 GHz 대역폭) 주파수 대역에서 중장거리용으로 개발되었으며, 최근 77~81 GHz의 최대 4 GHz 대역폭으로 확대되어 고해상도를 지원하는 근거리용 레이다가 주로 개발되고 있다.

안테나 측면에서 초기 차량용 레이다 안테나는 전자기합성이 쉽고 손실이 작은 파라볼릭 반사기 안테나와 렌즈 안테나가 많이 사용되었으나, 이러한 안테나는 큰 면적이 요구되며, 제작 비용이 높다는 문제가 있다. 한편, 마이크로스트립 안테나는 얇은 기판을 가지고 있고 제작 가격이 저렴하나, 상대적으로 레이다 안테나로 사용하기에는 손실이 큰 문제점이 있어 한동안 사용하지 못하고 있었다. MUSIC과 ESPRIT과 같은 신호처리 알고리즘의 발달로 안테나 이득 요구사항이 낮아짐에 따라 마이크로스트립 배열안테나가 주목받게 되었다^[1]. 하지만 여전히 마이크로스트립 배열안테나의 손실이 전체 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 요구사항 중 하나이다.

마이크로스트립 배열안테나는 구조에 따라서는 손실 특성이 다양하다. 일반적으로 직렬배열 구조가 병렬 배열 구조보다 전체 급전선의 길이가 짧아서 손실이 작아 주로 사용되고 있으며, 이러한 직렬급전 방식 마이크로스트립 배열안테나는 동작원리에 의해 정재파형 안테나와 진행파형 안테나로 구분된다. 밀리미터파대역 정재파형 또는 진행파형 직렬배열 구조에서는 기본적인 직사각형 방사소자보다는 스텝(stub) 형태의 방사소자를 사용한 콤(comb) 라인 구조가 손실이 작고 좁은 면적에 많은 방사소자를 배치할 수 있어 최근 많이 사용되고 있다^{[1]-[5]}.

한편, 레이다의 각도 분해능을 높이기 위해서는 좁은 빔폭과 낮은 부엽준위(side lobe level: SLL)가 요구된다. 부엽준위를 낮추기 위해 주로 체비세프, 테일러 등의 가중치 분포에 따라 각 방사소자의 방사전력을 조절하여 설계한다^[6]. 진행파 안테나는 방사소자의 방사전력 변화 폭이 넓어 부엽준위를 낮추기 쉬운 장점이 있지만, 빔 편이를 방지하기 위한 반사파 상쇄기법(reflection canceling)

이 추가적으로 요구되어 설계가 복잡해지고 안정성이 낮아지는 단점이 있다^{[1]-[6]}. 반면, 정재파 안테나의 경우, 안정적이나 방사소자의 방사전력을 변화시키는데 제한된다. 지금까지 발표된 대부분의 정재파형 마이크로스트립 콤라인 배열안테나는 -20 dB 부엽준위를 설계하여 제작하여도 설계 목표치를 달성하지 못하고 대부분 -17~-16 dB 정도에 머무르는 문제점을 공통으로 발견할 수 있다^{[5][7][8]}.

본 논문에서는 이렇게 설계 SLL을 만족하지 못하는 이유를 방사소자의 폭이 넓을수록 동일편파 외에 교차편파의 방사전력 성분이 커지게 된 것임을 밝히고, 교차편파 성분을 억제한 새로운 방사소자를 제안한다. 그리고 기존의 스텝형 방사소자에 적용되는 스텝의 특성 임피던스를 이용한 방사전력비를 구하는 방식은 제안하는 방사소자에 적용될 수 없으므로 기존 스텝형 방사소자와 새로운 방사소자의 방사전력비를 구할 수 있는 수식을 제안한다. 또한, 제안한 방사소자로 79 GHz 차량용 레이다 배열안테나를 설계 제작하여, 시뮬레이션 및 측정 결과를 비교하여 제안한 배열안테나를 검증한다.

II. 안테나 구성

마이크로스트립 콤라인 배열안테나는 그림 1과 같이 유전체 기판 위 직선의 급전선 위아래에 방사소자들을 반 파장($\lambda_g/2$) 간격으로 배치하여 방사소자 간 위상이 일치하도록 급전선에 직접 연결되어 있다. 급전선 끝은 개

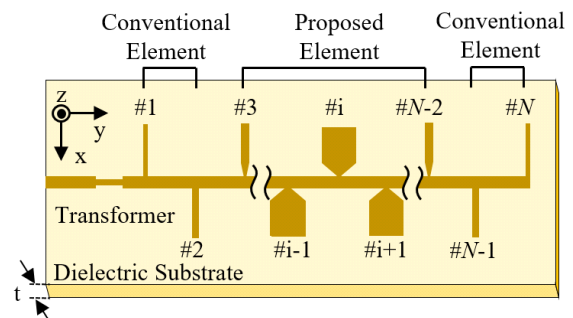


그림 1. 제안한 마이크로스트립 콤라인 배열안테나의 구조
Fig. 1. Configuration of proposed microstrip comb line array antenna.

방중단되어 정재파가 급전선에 형성되도록 하였으며, 안테나 입력부는 $\lambda/4$ 임피던스 변환기를 통하여 50 Ω 매칭되어 있다. 사용된 기판은 Isola의 Astra MT77로 비유전율 (ϵ_r) 3.0, 손실 탄젠트($\tan \delta$) 0.0017이며, 기판의 두께는 0.127 mm이다. 방사소자와 급전선, 접지면은 40 μm 두께의 구리로 제작되었으며, 급전선의 폭은 0.3 mm로 79 GHz에서 특성 임피던스가 50 Ω 에 해당한다.

제작한 배열안테나는 기존 스텝형 방사소자와 제안하는 방사소자 두 종류를 사용하며 브로드 사이드빔을 형성한다. 두 안테나는 스텝과 같은 방향으로 전개면(E-plane)이 수직방향으로 자계면(H-plane)이 형성된다. 전개면인 xz-평면에서는 넓은 빔폭이 자계면인 yz-평면에서는 좁은 빔폭과 낮은 부엽준위가 나타난다.

III. 안테나 설계

안테나의 설계와 분석에 전자기 구조 해석을 위한 상용 유한요소법(finite-element method: FEM) 시뮬레이션 툴인 HFSS가 이용되었다.

3-1 기존 방사소자와 콤라인 배열안테나 설계

그림 2는 기존의 스텝형 방사소자를 이용한 콤라인 배열안테나를 나타낸다. 그림 3(a)의 스텝형 방사소자는 폭(W_{Ci})에 따라 방사소자의 방사전력이 조절되고, 길이(L_{Ci})에 따라 공진주파수가 결정된다. 따라서 방사소자는 설계 주파수의 유효파장의 절반 정도의 길이를 가진다.

PCB 제작 시 안정적인 공정오차를 고려하여 최소 신호선 폭을 0.1 mm로 하였다. 따라서 가장 작은 방사전력

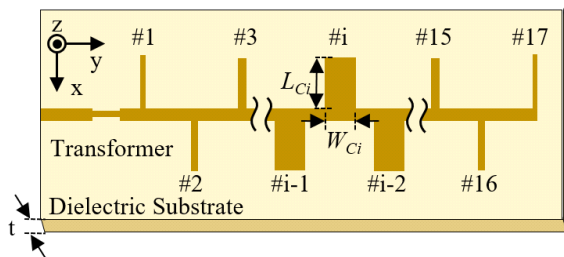


그림 2. 기존 마이크로스트립 콤라인 배열안테나
Fig. 2. Conventional microstrip comb line array antenna.

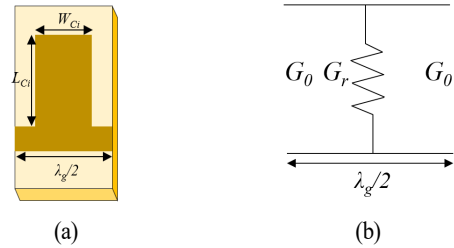


그림 3. 스텝형 방사소자 단위 셀의 (a) 구조와 (b) 공진시 등가회로

Fig. 3. (a) Unit cell structure and (b) the equivalent resonant circuit of stub-type radiating element.

을 가지는 방사 스텝(#1과 #17번 방사소자)의 폭(W_{Ci})을 0.1 mm로 하고, 이때 방사전력을 기준으로 하여 콤라인 배열안테나를 -20 dB SLL을 목표한 테일러 가중치 분포를 적용한다.

방사소자의 방사전력을 계산하기 위하여 그림 3(a)와 같이, 각 방사소자를 단위 셀(unit cell)으로 놓고 단위 셀의 길이를 조정하여 단위 셀의 위상이 반 파장이 되도록 하고, 스텝의 길이와 폭을 조정하여 방사계수가 최소가 되도록 한다.

그림 3(a)의 방사소자는 공진주파수에서 그림 3(b)와 같은 등가회로를 가진다고 가정하자. 방사소자에 의한 방사전력은 방사 컨덕턴스(G_r)와 인가되는 전압(V)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_r = V^2 G_r \quad (1)$$

방사소자에 의한 방사전력이 방사컨덕턴스에 비례하므로, 배열 소자의 가중치 분포를 방사소자의 방사전력 대신 방사 컨덕턴스에 적용하여 설계할 수 있다. 방사소자의 정규화된 방사 컨덕턴스는 다음의 식을 이용하여 얻을 수 있다^[9].

$$g_r = \frac{G_r}{G_0} = 2 \frac{1 - S_{21}}{S_{21}} \quad (2)$$

여기서 S_{11} 과 S_{21} 은 단위 셀의 반사계수와 투과계수로 EM 시뮬레이션 툴을 통해 얻을 수 있다. 식 (2)는 도파관 슬롯 안테나의 정규화된 방사 컨덕턴스로 콤라인 방사소자 끝에서 자기 다이폴이 형성되는 것이 슬롯에서 자기 다

이풀이 형성되는 것과 같아 식 (2)가 적용될 수 있다.

3-2 제안한 방사소자

앞에서 설명한 스텝형 방사소자를 이용한 배열안테나는 설계목표 SLL을 가지는 가중치 분포를 주더라도 시뮬레이션 결과가 목표 SLL에 도달하지 못하는 현상이 발생한다.

그림 4는 17개의 방사소자 중에 가장 얇은 방사소자 #1과 배열 중앙에 배치된 두꺼운 방사소자#9의 전류분포를 나타낸다. 폭이 얇은 방사소자 #1은 전류성분이 스텝길이 방향(x축 방향)으로만 향하여 동일한 방향 편파의 원거리장을 방사하는 반면, 폭이 넓은 방사소자는 길이방향의 전류뿐만 아니라, 그 수직방향(y축 방향)의 전류성분도 생성되는 것을 알 수 있다. 따라서, 폭이 넓은 방사소자는 동일편파뿐만 아니라, 교차편파의 원거리장을 방사하여 기존의 설계법으로 가중치 분포를 주면 가중치 일부가 원치 않는 교차편파 성분으로 방사되어 설계 목표치의 SLL에 도달하지 못하는 것임을 예상할 수 있다. 즉, 식 (2)는 동일편파와 교차편파에 의한 컨덕턴스 값을 가지므로 기존의 설계법으로 정확한 설계가 어렵다는 것을 의미한다.

제안하는 방사소자는 기존의 스텝형 방사소자의 교차편파 성분 전류를 최소화하는 구조로 그림 5의 형상을 한다. 그림 4(b)와 같이 스텝형 방사소자에서 교차편파를 형

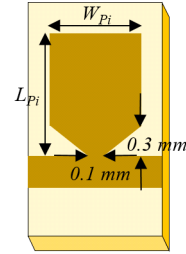


그림 5. 제안한 방사소자의 단위 셀
Fig. 5. Unit cell of proposed radiating element.

성하는 전류 성분은 방사소자의 위쪽과 아래쪽에 주로 위치해 있으며, 위아래에 형성되는 전류간 거리가 반파장에 가까우므로 해당 전류에 의해 방사되는 전력은 보강되어 더 두드러지게 나타날 가능성이 크다. 특히 방사소자 아래쪽의 교차편파 전류 성분이 크게 나타나기 때문에 제안하는 방사소자는 그림 5와 같이 급전선과의 연결 부분의 폭을 0.1 mm로 일정한 값을 가지도록 방사소자의 밑부분을 깎은 방패형 구조이다.

그림 6은 기존의 스텝형과 제안한 방사소자의 전류분포를 나타낸다. 제안한 방사소자 위와 아래에서 형성되는 교차편파의 전류성분 방향이 반대로 향하여 교차편파를 형성하는 방사 성분이 상쇄될 것으로 예측할 수 있다. 그뿐만 아니라, 정재파 구조의 직렬급전 방식의 경우 방사소자가 정재파의 최대가 되는 지점에 있어야 하는데, 기존의 많은 전력을 방사하는 폭이 넓은 스텝형 소자는 넓

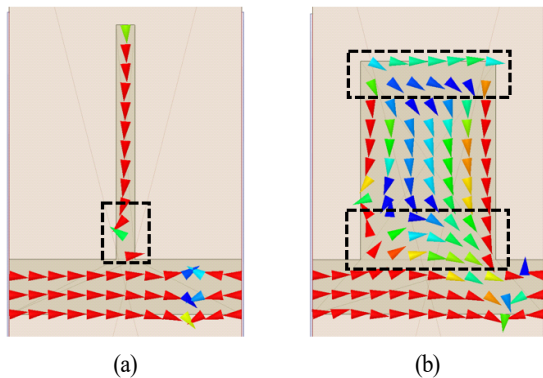


그림 4. (a) 폭이 좁은 방사소자와 (b) 폭이 넓은 방사소자의 전류분포
Fig. 4. Electric current distribution of (a) narrow and (b) wide radiation elements.

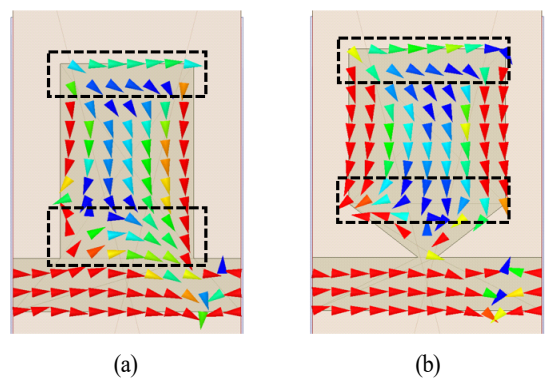


그림 6. (a) 기존 방사소자와 (b) 제안한 방사소자의 전류분포
Fig. 6. Electric current distribution of (a) conventional and (b) proposed radiating element.

은 방사소자의 폭 때문에 원하는 지점에서 피딩라인이 방사소자를 여기하는 것을 보장할 수 없다. 반면, 제안한 방사소자를 사용하게 되면 방사소자와 급전선과의 연결 부분이 좁아서 정확한 위치에 방사소자가 위치할 수 있다는 장점이 있다.

3.3 제안한 방사소자를 이용한 콤라인 배열안테나 설계

제안한 방사소자를 이용한 콤라인 배열안테나는 앞서 소개한 그림 2와 같은 구조로, 제안한 방사소자를 이용한 콤라인 배열안테나의 성능을 기존의 스텝형 방사소자 콤라인 배열안테나의 성능과 비교하기 위하여 2종의 콤라인 배열안테나를 설계 제작한다.

제안한 방사소자를 이용한 콤라인 배열안테나에서 교차편파 전류성분이 작은 폭이 좁은 스텝형 방사소자는 그대로 사용하고, 교차편파 성분이 큰 경우, 제안한 방사소자를 적용하여 배열안테나를 설계한다. 제안한 방사소자의 컨덕턴스는 기존의 방사소자와 같이 단위 셀 해석을 통하여 식 (2)로부터 얻는다. -20 dB의 SLL을 가지는 테일러 가중치 분포에 따른 방사 컨덕턴스 크기에 맞게 표 1과 같은 제반 사항을 갖는 방사소자들이 배치된다.

IV. 안테나 제작 및 측정 결과

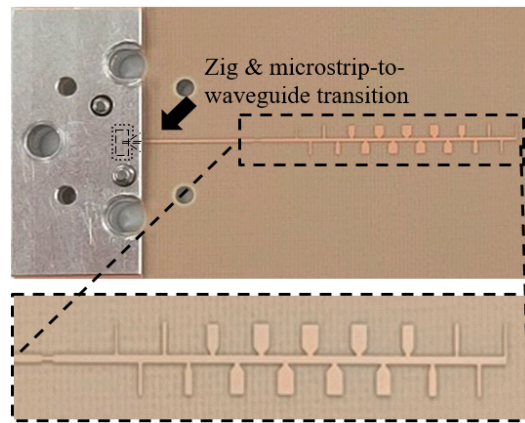
밀리미터파 대역에서 제안한 콤라인 배열안테나의 타당성을 확인하기 위해 안테나 시제품을 그림 7과 같이 제작했고, 안테나 성능으로 반사계수와 방사패턴을 측정하였다. 안테나 성능 측정이 쉽도록 프로토타입은 금속 지그 위에 부착하였고, 광대역 마이크로스트립-도파관 전이부(transition)를 통해 WR-10 표준 도파관에 연결하였다^[10]. 반사계수와 방사패턴은 Agilent E8364B PNA 네트워크 분석기에 V15VNA2-T/R과 V10VNA2-T/R VNA 확장 모듈을 달아 측정하였고, 방사패턴은 밀리미터 무반사 챔버에서 측정하였다.

그림 8은 기존의 1×17 콤라인 배열안테나와 제안한 1×17 콤라인 배열안테나의 측정 및 시뮬레이션한 반사계수를 나타낸다. 기존 콤라인 배열안테나의 -10 dB 대역 폭은 4.36 GHz로 측정되었고, 제안한 콤라인 배열안테나

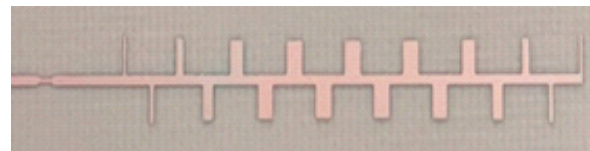
표 1. 1×17 마이크로스트립 콤라인 배열안테나의 파라미터

Table 1. Parameter of proposed 1×17 microstrip comb line array antenna.

Radiating element number ($i= 1-17$)	Width (W_{Ci} or W_{Pi}) [mm]	Length (L_{Ci} or L_{Pi}) [mm]	Weight (Conductance)
1, 17	0.1	1.28	1
2, 16	0.17	1.23	1.1159
3, 15	0.2	1.24	1.3521
4, 14	0.38	1.21	1.7074
5, 13	0.58	1.18	2.1605
6, 12	0.71	1.18	2.6493
7, 11	0.79	1.19	3.1195
8, 10	0.83	1.18	3.4480
9	0.84	1.17	3.5676



(a) 제안한 프로토타입
(a) Proposed prototype



(b) 기존 프로토타입
(b) Conventional prototype

그림 7. 제작한 마이크로스트립 콤라인 배열안테나의 사진
Fig. 7. Photographs of manufactured microstrip comb line array antenna.

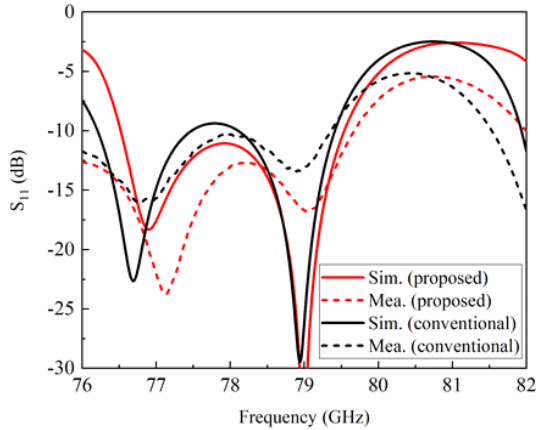


그림 8. 기존 1×17 콤라인 배열안테나와 제안한 1×17 콤라인 안테나의 반사특성

Fig. 8. Reflection characteristics of conventional and proposed 1×17 comb line array antennas.

는 4.55 GHz로 좀 더 넓은 대역폭 특성을 가진다. 공통으로 설계 주파수 기준 낮은 주파수 대역에서 좋은 반사특성이 나타난다. 전체적으로 널과 피크 등의 패턴이 유사하고, 반사계수의 값 차이는 공정상의 오차와 유전체 기판 전기적 특성차에 의한 것으로 보인다.

그림 9는 79 GHz에서 측정된 yz-평면 방사패턴을 나타낸다. 기존 콤라인 배열안테나는 SLL이 좌우 -17.3 dB, -16.3 dB로 측정됐고, 제안한 콤라인 배열안테나는 좌우 -21.9 dB, -22.1 dB로 측정됐다. 제안한 콤라인 배열안테나는 기존 콤라인 배열안테나와 비교하면 SLL은 좌우 -4.5 dB, -5.8 dB 낮아졌고, 목표치 SLL -20 dB를 충족하였다.

그림 10은 주파수에 따른 안테나 정면에서의 이득을 나타낸다. 79 GHz에서 기존 콤라인 배열안테나의 시뮬레이션 결과는 16.48 dBi, 측정 결과는 14.48 dBi로 2 dB 차이가 났고, 제안한 콤라인 배열안테나의 시뮬레이션 결과는 16.92 dBi, 측정 결과는 15.31 dBi로 1.61 dB 차이가 났다. 이는 마이크로스트립에서의 유전체 손실과 도체손실이 시뮬레이션에 비해 크게 나타난 것과 전이부에 의한 손실이 주요한 이유로 판단되며, 추가적으로 그림 8의 반사계수 특성에서 볼 수 있듯이 정합회로에서의 정합손실의 영향도 나타났기 때문으로 판단된다²⁾. 특히, 제안한 콤라인 배열안테나가 기존 콤라인 배열안테나보다 급진

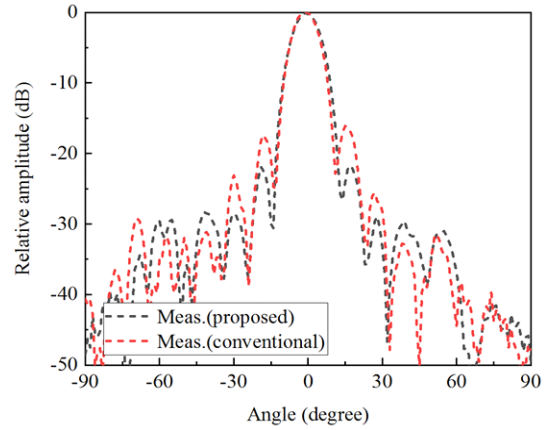


그림 9. 79 GHz에서 측정된 방사패턴

Fig. 9. Radiation pattern measured at 79 GHz.

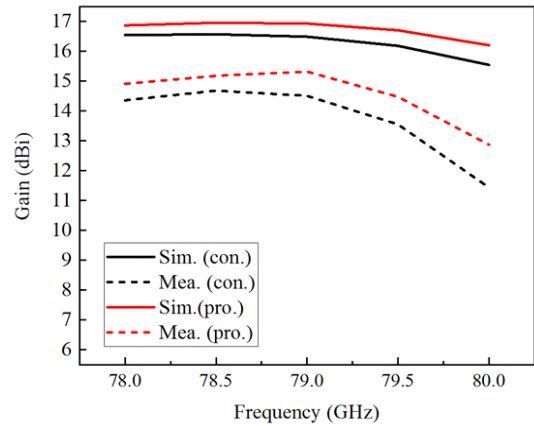


그림 10. 안테나 정면에서의 주파수에 따른 이득 변화

Fig. 10. Gain from the front of the antenna with respect to frequency.

선 길이가 약 0.812 mm 정도 짧아 손실이 더 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 안테나 이득이 주파수가 높아질수록 낮아지는 것은 그림 8에서와같이 주파수가 높을수록 반사특성이 좋지 않게 나타난 것과 마이크로스트립에서의 유전체 손실과 도체손실이 주파수가 높아질수록 커지기 때문인 것을 알 수 있다.

그림 11은 각각 78, 79와 80 GHz에서 제안한 1×17 콤라인 배열안테나의 yz-평면과 xz-평면 방사패턴을 나타낸다. 78 GHz와 80 GHz에서도 SLL이 -20 dB에 도달하며, 시뮬레이션 결과와 잘 일치한 방사패턴이 측정되었다.

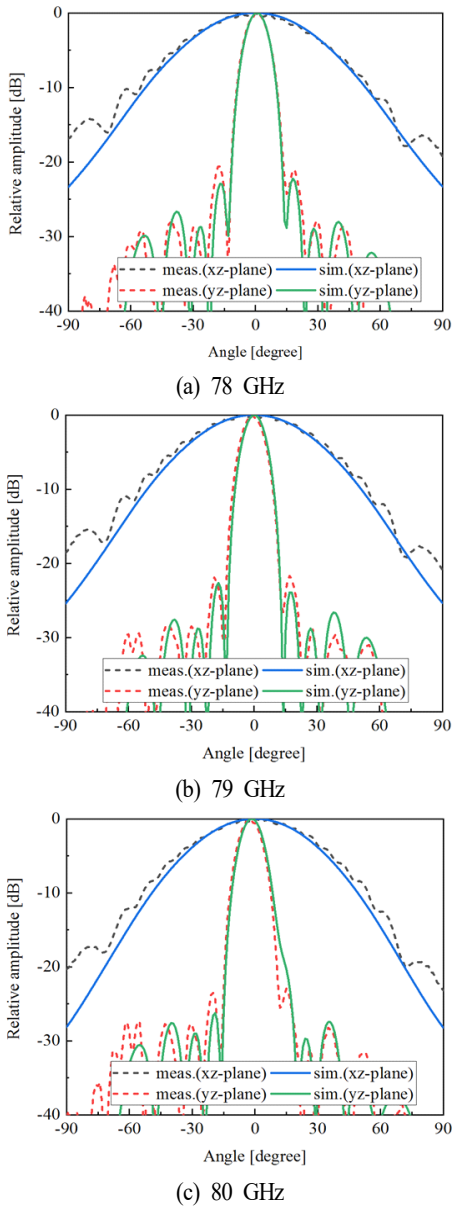


그림 11. 제안한 1×17 콤라인 배열안테나의 방사패턴
 Fig. 11. Radiation pattern of the proposed 1×17 comb line array antenna.

V. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 낮은 부엽준위를 갖는 새로운 마이크로스트립 콤라인 배열안테나를 제안하였다. 배열안테나의 방사소자는 폭이 얇아 방사 컨덕턴스

가 작은 경우 기존의 스텝형 방사소자를 사용하고, 폭이 두꺼워 큰 방사 컨덕턴스를 가지는 경우 급전선과의 연결부분이 얇은 방패형 방사소자를 사용하여 배열로 구성하였다. 제안한 1×17 마이크로스트립 배열안테나는 79 GHz의 설계 주파수로 유전체 기판 위에 설계 및 구현되었고, 설계목표 부엽준위를 만족하는 빔패턴을 측정을 통하여 확인하였다. 제안한 방사소자는 교차편파 방사성분이 작으므로 컨덕턴스 기반의 가중치 분포 배열안테나 설계에 적합하며, 구현된 구조의 배열안테나는 부엽준위가 낮아 레이더의 명확한 목표물 탐지를 위한 레이더 안테나로 적합할 것이다.

Reference

- [1] S. Sugawa, K. Sakakibara, N. Kikuma, and H. Hirayama, "Low-sidelobe design of microstrip comb-line antennas using stub-integrated radiating elements in the millimeter-wave band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 10, pp. 4699-4709, Oct. 2012.
- [2] H. Iizuka, T. Watanabe, K. Sato, and K. Nishikawa, "Millimeter-wave microstrip array antenna for automotive radars," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 86, no. 9, pp. 2728-2738, Sep. 2003.
- [3] L. Zhang, W. Zhang, and Y. P. Zhang, "Microstrip grid and comb array antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 11, pp. 4077-4084, Nov. 2011.
- [4] Y. Hayashi, K. Sakakibara, M. Nanjo, S. Sugawa, N. Kikuma, and Y. Hayashi, "Millimeter-wave microstrip comb-line antenna using reflection-canceling slit structure," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, no. 2, pp. 398-406, Feb. 2010.
- [5] D. Wu, "76~81 GHz planar antenna development and utilization for automotive radar applications," M.S. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2016.
- [6] V. K. Kothapudi, "SFCFOS uniform and Chebyshev amplitude distribution linear array antenna for K-band applications," *Journal of Electromagnetic Engineering*

and Science, vol. 19, no. 1, pp. 64-70, Jan. 2019.

- [7] A. Pandey, *Practical Microstrip and Printed Antenna Design*, Norwood, MA, Artech House, pp. 322-324, 2019.
- [8] Q. Zhang, L. Wang, and X. Zhang, "Millimeter-wave microstrip comb-line antenna array for automotive radar," in *2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory(ISAPE)*, Hangzhou, 2018,

pp. 1-3.

- [9] D. Liu, H. Nakano, X. Qing, and T. Zwick, *Handbook of Antenna Technologies*, Gateway East, Springer, pp. 1389-1413, 2016.
- [10] K. Seo, A. Kishk, "Planar microstrip-to-waveguide transition in millimeter-wave band," in *Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*, Rijeka, IntechOpen, pp. 249-277, 2013.

이 상 훈 [한국해양대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6986-9930>



2018년 8월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
 2018년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF, 차량용 레이더 시스템, 안테나

서 동 욱 [한국해양대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9449-7772>



2003년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2005년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학석사)
 2011년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학박사)
 2011년 1월 ~ 2012년 9월: 국방기술품질원

선임연구원

2012년 10월 ~ 2017년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원
 2017년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
 [주 관심분야] 전자파 수치해석, RCS 해석, 레이더 시스템, 레이더 신호처리, 무선전력전송

이 재 호 [한국전자통신연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6878-8848>



2002년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2004년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학석사)
 2010년 9월: 일본 Tokyo Institute of Technology 전기및전자공학 (공학박사)
 2004년 5월~2005년 7월: 정보통신연구원

홍원 연구원

2010년 9월~2012년 2월: 삼성탈레스 전문연구원
 2013년 3월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원
 [주 관심분야] 안테나 이론, 배열안테나, 레이더 시스템