빔 조향이 가능한 직사각형 루프 배열 안테나의 설계

Design of a Rectangular Loop Array Antenna for Beam Scanning

구한이 · 한인희* · 김동석* · 김찬홍** · 박동철

Hanni Koo · In-Hee Han* · Dong-Seok Kim* · Chan-Hong Kim** · Dong-Chul Park

요 약

본 논문에서는 빔 조향이 가능한 직사각형 루프 배열 안테나를 설계하였다. 먼저 RWG 모멘트 법(RWG MoM: Rao Wilton Glisson Method of Moment)을 통해 안테나의 조향 소자 패턴을 이론적으로 고찰하였다. 다음, 상용 툴(tool)인 CST사의 MWS(Microwave Studio)를 이용하여 얻은 시뮬레이션 결과와 모멘트 법 결과를 비교하였다. 8×5 부배열을 제작하고 측정하여 그 결과를 시뮬레이션 결과, 그리고 모멘트 법 결과와 비교함으로써 접근 방법의 타당성을 검증하였다. 제작된 8×5 부배열 안테나는 E-면에서 고각 방향으로의 ±45° 빔 조향 범위 내에서 평탄한 이득 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a rectangular loop array antenna for beam scanning is designed. A program using RWG MoM(Rao Wilton Glisson Method of Moment) is developed for SEP(Scan Element Pattern) theoretically. Simulation results obtained by using a commercial software tool, MWS are compared with the MoM results to confirm the validity of the program. Also these results are compared with the measured ones for the case of an 8×5 subarray. The fabricated 8×5 subarray showed a flat gain characteristic in the elevation scan range of ±45° in the E-plane.

Key words : Rectangular Loop Array Antenna, Balun, RWG MoM, Scan Element Pattern(SEP)

Ⅰ. 서 론

현재 국내에서는 능동형 다기능 레이더의 개발에 관심을 갖기 위해 많은 노력을 기울이고 있으나, 능동형 다기능 레이더에 적용시키기 위한 배열 안테나에 대한 연구조차 아직 시작 단계에 있는 실정이다. 따라서 능동형 다기능 레이더의 핵심 기술인 배열 안테나를 연구하여 선진국에서 실용화되기 시작한, 능동형 다기능 레이더의 국내 개발에 기여하는 것은 매우 중요하다고 판단된다.

본 논문에서는 직사각형 루프 배열 안테나를 제안하고 있으며, 이 배열 안테나의 조향 소자 패턴(Scan Element Pattern: SEP)을 확인하여 원하는 빔 조향 범위 내에서 평탄한 이득을 갖는 안테나를 설계하였다.

먼저 기존 루프 안테나의 동작 원리와 안테나 급전 선로에 대한 고찰[1]~[3]을 바탕으로 루프 배열 안테나의 단일 소자를 설계하였다. 단일 소자의 이득과 반사 손실 특성을 향상시키기 위해, 안테나의 둘레를 한 파장(λ_o) 정도로 유지하면서 가로와 세로의 길이를 변형시켜 특성을 고찰하였다. 또한, 루프 안테나의 반사 판(ground plane)과 안테나 사이의 간격을 $\lambda_o/4$ 정도로 설정하였다.

안테나를 급전하기 위해 밸런(balun)을 설계하였

「본 연구는 한국과학기술원 전파탐지특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었음.」

충남대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Engineering, Chungnam National University)

*(주)엠티지(Microwave Technologies Group)

**국방과학연구소(Agency for Defence Development)

· 논 문 번 호 : 20070518-11S

· 수정완료일자 : 2007년 7월 31일

으며, 설계된 단일 소자와 밸런을 이용하여 직사각형 배열 격자 구조[4]로 배열 소자를 설계하였다. RWG(Rao Wilton Glisson) 모멘트 법을 이용해서 해석 구조의 표면을 삼각형 패치로 모델링을 하고 전계 적분 방정식(EFIE: Electric Field Integral Equation)을 통해 전류 분포를 구하였다[5]. 이를 바탕으로 참고문헌 [6]을 통해서 설계된 안테나의 방사 패턴을 수치해석하였다. 배열 소자에 대해서는 참고문헌 [4]와 [7]에서 언급한 조향 소자 패턴을 고찰하고 이를 시뮬레이션하였다. 마지막으로 모멘트법과 시뮬레이션 결과들의 타당성을 확인하기 위하여 8×5 부배열 안테나를 실제 제작하여 얻은 측정 결과와 비교 분석하였다.

Ⅱ. 사각 루프 배열 안테나 구조

표 1은 본 논문에서 고려한 8×5 루프 부배열 안테나의 기본 설계 규격이다.

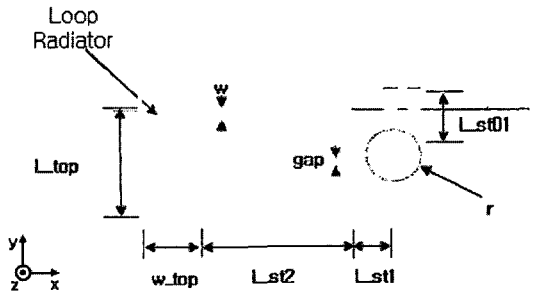
2-1 단일 소자

그림 1은 루프 배열 안테나를 구성하고 있는 단일 루프 안테나 구조와 파라미터들을 보여준다. 그림 1(a)를 살펴보면 코플래너 스트립(coplanar strip) 형태의 급전 선로가 접지 판에서 나와, 각각 아래와 왼쪽으로 총 두 번 꺾여 사각형 루프를 급전시키고 있다. 기본적으로 사각형 루프 안테나의 공진은 루프 둘레가 중심 주파수에서 한 파장(λ_o)보다 약간 클 때 발생하고 방사 패턴 특성은 원형 루프 안테나와 비슷한 특성을 갖는다[1],[2].

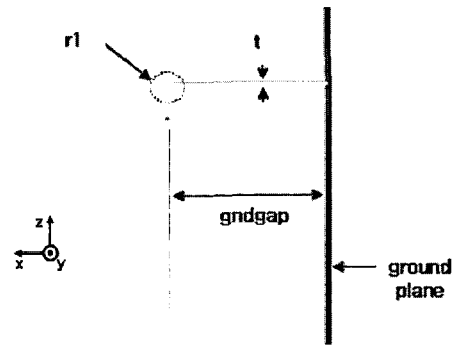
이득과 반사 손실 특성을 향상시키기 위해 루프의 둘레를 한 파장 정도로 유지시키면서 가로변의 변수 l_st2와 세로변의 변수 l_top의 최적화된 값을 찾아내었다. 그리고 루프 한 변의 폭(w_top)을 넓게

표 1. 루프 배열 안테나의 규격
Table 1. Specification of a loop array antenna.

동작 주파수	S-대역
중심 주파수	f_o
대역 폭	12.9 %
최대 빔 조향 범위	고각: ±45° 방위각: 고정 빔(8°)



(a) 정면도
(a) Front view



(b) 측면도
(b) Side view

그림 1. 단일 루프 안테나의 구조와 파라미터
Fig. 1. Single loop antenna and its parameters.

하였으며, 그림 1(b)와 같이 접지 판과 안테나 사이의 간격(gnd_gap)은 접지 판 앞쪽으로의 방사가 최대가 될 수 있도록 $\lambda_o/4$로 설정하였다.

2-2 밸런

안테나의 급전은 스트립라인(stripline)과 결합 스트립라인(coupled stripline) 그리고 코플래너 스트립을 이용하였다. 그림 2에서 밸런은 스트립라인과 결합 스트립라인으로 구현하였다. 먼저 스트립라인에서 시작하여 결합 스트립라인, 코플래너 스트립으로 변천되어 급전되며, 이들 각각에 대하여 그림 3에 그 단면 구조를 나타내었다. 각각의 급전 선로에 대한 임피던스는 참고문헌 [3]을 통해서 구할 수 있다.

먼저 밸런 입력단에 50 Ω 스트립라인이 병렬 형태로 나누어져 각각의 선로에 100 Ω 라인이 형성된다. 그러나 밸런 출력단에 루프 입력단의 선로 폭과 간격을 고려하야 하므로 실제로는 100 Ω 라인의 선

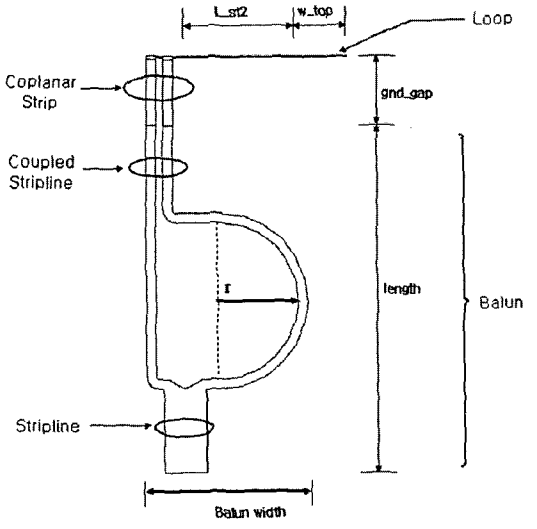
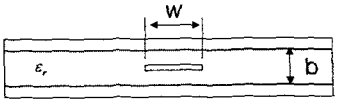
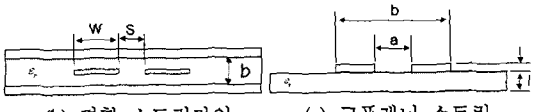


그림 2. 벨런의 구조
Fig. 2. Balun structure.



(a) 스트립라인
(a) Sripline



(b) 결합 스트립라인 (c) 코플래너 스트립
(b) Coupled stripline (c) Coplanar strip

그림 3. 루프 안테나의 급전 선로들
Fig. 3. Feed lines for a loop antenna.

로 폭보다 약간 작다. 벨런에서 선로의 길이는 위상차를 180°로 만들어 주기 위해 반 파장만큼 경로차를 두었다. 그리고 50 Ω 스트립라인을 입력단으로 보고 결합 스트립라인을 출력단으로 보았을 때 그림 4와 같이 반사 손실 특성을 보였다. 반사 손실은 대역 내에서는 20 dB 이하로 떨어지는 것을 만족시켰다.

2-3 배열 소자

그림 5는 사각형 배열 격자 구조를 나타낸 것이다. E-면 배열 간격 dx는 식 (1)로 결정된다[4].

$$dx \le \frac{\lambda_h}{1+\sin\theta_{max}} \quad (1)$$

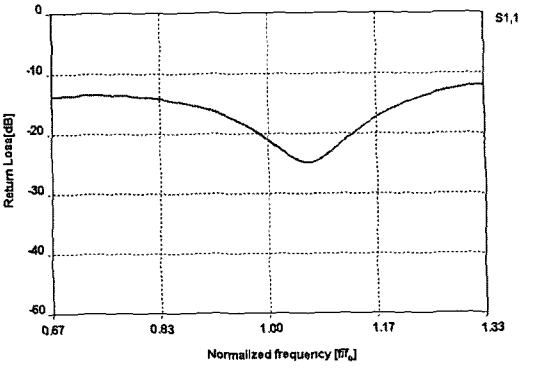


그림 4. 벨런의 반사 손실 특성
Fig. 4. Return loss of the balun.

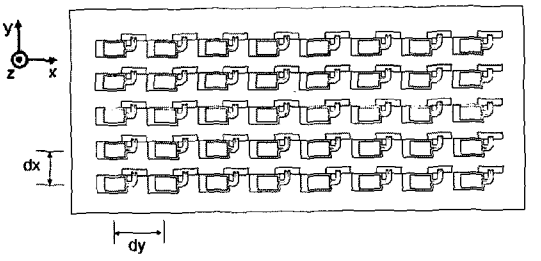


그림 5. 사각형 배열 격자 구조
Fig. 5. Rectangular array grid structure.

여기에서 θ_{max}는 최대 빔 조향 범위를 의미하며, λ_h는 상한 주파수에서의 파장을 나타낸다. 식 (1)로부터 E-면 배열 간격을 0.53 λ_h로 결정하였다. λ_h는 상한 주파수에서의 파장이다. H-면 배열 간격 dy는 일반적으로 고정 빔 응용의 경우 0.7 λ_0~0.9 λ_0 정도로 결정되고[3], 우리의 경우 dy는 0.83 λ_h로 설정하였다.

Ⅲ. RWG 모멘트 법을 이용한 해석

그림 6은 삼각형 패치들로 모델링된 단일 소자를 보여주고 있다. 삼각형 패치는 복잡한 임의의 구조도 쉽게 모델링 할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 모델링 된 구조는 전계 적분 방정식을 통해 완전 도체 표면의 전류 분포를 구할 수 있다. 모멘트 법을 이용하여, 복잡한 구조체에 탑재된 안테나의 복사 패턴을 비롯한 여러 가지 전자파 문제를 해결할 수 있다[5],[6]. 완전 도체인 구조체에 외부로부터 입사 전계 $\overrightarrow{E^i}$가 입사하면 구조체 표면의 표면 전류 $\overrightarrow{J^s}$에

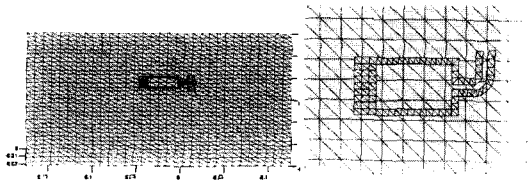


그림 6. 삼각형 패치로 모델링된 단일 소자 구조
Fig. 6. Single element structure modeled by triangular patches.

의해 산란 전계 $\vec{E}^s$가 발생된다. 이때에 산란 전계는 식 (2)로 주어진다.

$$\vec{E}^s = -jw\vec{A} - \nabla\Phi \tag{2}$$

여기서 자계 벡터 포텐셜 $\vec{A}$와 스칼라 포텐셜 Φ는 식 (3)과 식 (4)로 주어진다.

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi}\int_s \vec{J}\frac{e^{-jkR}}{R}dS' \tag{3}$$

$$\Phi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\int_s \sigma\frac{e^{-jkR}}{R}dS' \tag{4}$$

또한 k는 위상상수이고, $R=|\vec{r}-\vec{r}'|$은 관측점 $\vec{r}$과 도체 표면 위에 있는 임의의 점 $\vec{r}'$ 사이의 거리이다. 또한, 표면 전하 밀도 σ는 전류 연속 방정식 (5)에 의하여 표면 전류 밀도와 연관하여 표현될 수 있다.

$$\nabla_s \cdot \vec{J} = -j\omega\sigma \tag{5}$$

따라서 산란 전계를 표현한 식 (2)는 식 (3), (4), 그리고 (5)를 이용하면 표면 전류 $\vec{J}$만의 함수인 식 (6)으로 표현될 수 있다.

$$\vec{E}^s = -jw\frac{\mu}{4\pi}dint_s\vec{J}(\vec{r}')\cdot\frac{e^{-jkR}}{R}dS' - \frac{j}{4\pi\varepsilon\omega}dint_s(\nabla_s'\cdot\vec{J}(\vec{r}'))\cdot\frac{e^{-jkR}}{R}dS' \tag{6}$$

다음, 도체 표면에서 총 전계의 접선 성분이 0이므로,

$$\hat{n}\times(\vec{E}^i + \vec{E}^s) = 0 \text{ on } S \tag{7}$$

이 되고 이 경계 조건으로

$$-\vec{E}^i{}_{\tan} = (-j\omega\vec{A} - \nabla\Phi)_{\tan} \quad \vec{r} \text{ on } S \tag{8}$$

을 얻을 수 있으며, 식 (7)에서 $\hat{n}$은 도체 표면 S에

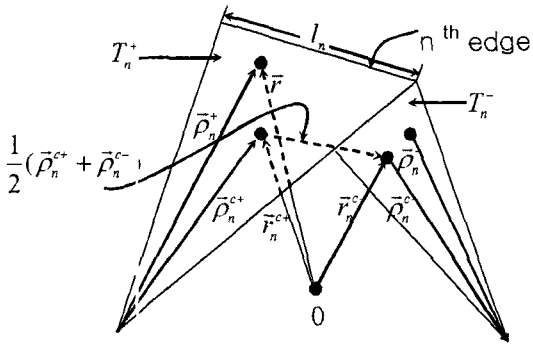


그림 7. 삼각형 쌍과 기하학적인 파라미터
Fig. 7. Triangle pairs and geometrical parameters.

수직인 단위 벡터를 말한다. 표면 전류를 기저 함수로 표현하고, 식 (8)에 기저 함수와 같은 형태의 시험 함수를 곱하여 내적을 취하면 식 (9)를 얻게 되고, 식 (9)에서의 내적은 식 (10)과 같이 정의된다.

$$\langle \vec{E}^i, \vec{f}_n\rangle = j\omega\langle \vec{A}, \vec{f}_m\rangle + \langle \nabla\Phi, \vec{f}_m\rangle \tag{9}$$

$$\langle \vec{f}, \vec{g}\rangle \equiv -\int_S \vec{f}\cdot\vec{g}\,ds \tag{10}$$

그림 7에 내부 변과 그와 연관된 삼각형 쌍과 기하학적인 파라미터들을 보였다. 벡터 기저 함수는 식 (11)과 같이 주어진다[5].

$$\vec{f}_n(\vec{r}) = \begin{cases} \dfrac{l_n}{2A_n^+}\vec{\rho}_n^+, & \vec{r} \text{ in } T_n^+ \\ \dfrac{l_n}{2A_n^-}\vec{\rho}_n^-, & \vec{r} \text{ in } T_n^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{11}$$

벡터 기저 함수를 이용하여 표면 전류를 확장시키면 식 (12)로 표현된다.

$$\vec{J} \cong \sum_{n=1}^{N} I_n\vec{f}_n(\vec{r}) \tag{12}$$

여기서 N은 내부 변의 총 개수이며, 각 계수 I_n은 n번째 변을 직교하여 흐르는 표면 전류 밀도이다. 식 (9)와 식 (12)로부터 식 (13)과 같은 행렬 방정식을 얻을 수 있다.

$$ZI = V \tag{13}$$

여기서 $Z=[Z_{mn}]$은 $N\times N$ 행렬 매트릭스이고, $I=[I_n]$과 $V=[V_m]$은 길이 N인 열 벡터이다.

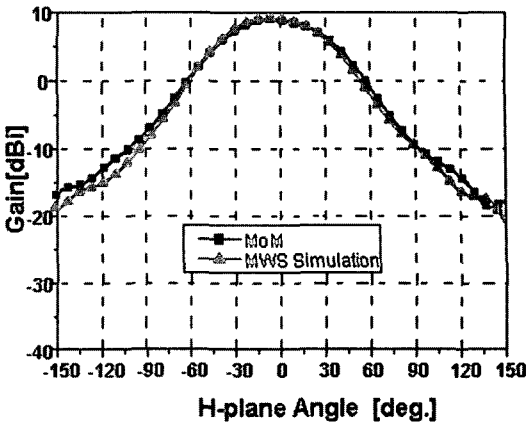
Ⅳ. 단일 및 배열 소자의 방사 패턴 고찰

RWG 모멘트 해석 이론을 통하여 전류 분포를 구하고, 방사 패턴을 계산하였다. 그리고 그 결과를 CST사의 MWS를 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 먼저 그림 8과 같이 단일 소자에 대해서 중심 주파수에서 모멘트 법으로 계산한 방사 패턴과 MWS 시뮬레이션 결과를 그림 9에 비교하였다. 중심 주파수에서 E-면과 H-면 모두 모멘트 법을 이용한 결과와 시뮬레이션 결과가 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

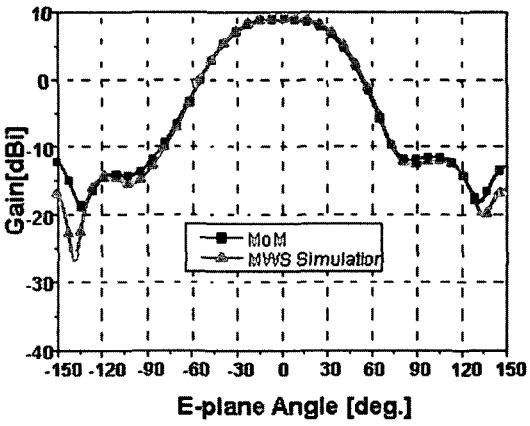
부배열의 크기를 선정하기 위해 E-면 배열 개수를 증가시키면서 상호 결합 현상이 충분히 고려될 때까지 조향 소자 패턴 시뮬레이션을 수행하였다. E-면에서는 최소 5열 이상일 때 충분히 수렴함을 확인하였고, H-면에 대해서는 고정 빔폭 8°를 만족시키도록 배열 개수를 8열로 선정하였다.

그림 10은 8×5 부배열의 MWS 모델을 나타낸다. 이 모델에서 중심 소자만 여기시키고 나머지 소자들은 모두 종단시켜 조향 소자 패턴을 확인하였다. 여기서 조향 소자 패턴은 배열 속에서 상호 결합 현상이 충분히 고려된 단위 복사 소자가 갖는 패턴을 의미하며, 보통 원래의 단일 복사 소자가 갖는 패턴과는 전혀 다른 특성을 갖는다[4],[7].

그림 11은 E-면 방향에 대해 모멘트 법으로 구한 조향 소자 패턴 및 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. H-면 방향은 고정 빔이기 때문에 중심 주파수에서 E-면 방향으로의 이득을 고찰하였다. 단일 소자



(a) H-면
(a) H-plane



(b) E-면
(b) E-plane

그림 9. MoM으로 계산되고 MWS로 시뮬레이션 된 방사 패턴의 비교
Fig. 9. MoM-calculated and MWS-simulated radiation patterns.

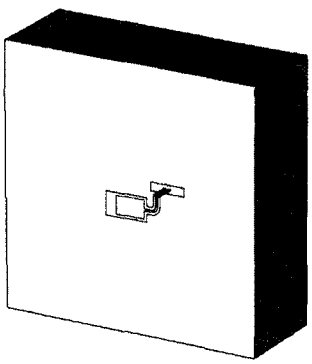


그림 8. 단일 소자 MWS 모델
Fig. 8. Single element MWS model.

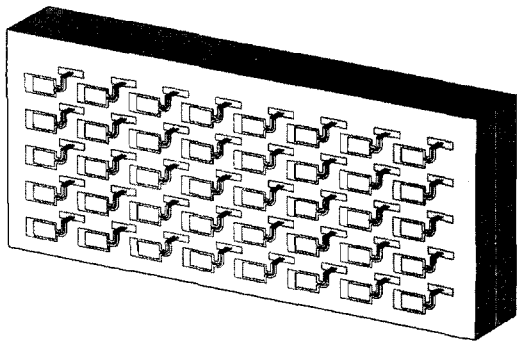


그림 10. 시뮬레이션을 위한 8×5 부배열 MWS 모델
Fig. 10. A 8×5 subarray MWS model for simulation.

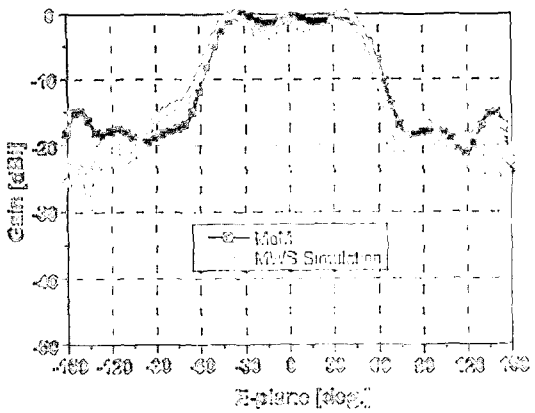


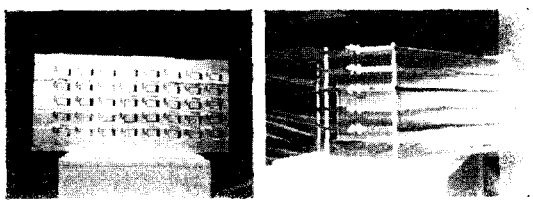
그림 11. MoM으로 계산되고 MWS로 시뮬레이션된 조향 소자 패턴의 비교

Fig. 11. MoM-calculated and MWS-simulated scan element patterns.

일 때와는 전혀 다른 특성을 가지며 0°를 중심으로 ±45° 범위 내에서 평탄한 이득 특성을 가져 이 범위에서 빔 조향이 가능함을 보여준다.

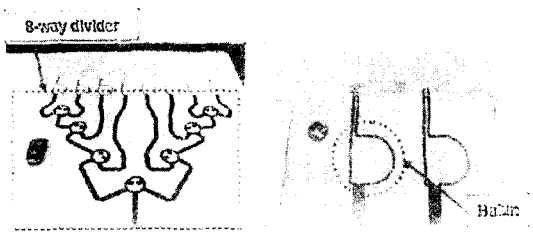
V. 제작 및 측정

루프 안테나 부분은 MoM을 이용한 계산 결과와 MWS 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제작하였고, 밸런과 급전기는 MoM으로 계산이 어렵기 때문에 MWS 시뮬레이션을 결과를 바탕으로 제작하였다. 그림 12는 제작된 8×5 부배열 안테나를 나타내고 있다. 루프 안테나는 접지면 앞에 공기 중에 떠 있으며 알루미늄으로 구현된 루프 안테나 자체의 두께로 인해 모양을 유지할 수 있다. 또한, 안테나의 전도성을 좋게 하기 위해 알루미늄을 금으로 도금하였다. 그리고 제작된 안테나에서 접지판의 크기는 7.5 λ_o×3.5 λ_o(약 730×340 mm) 알루미늄이다. 그림 12(b)는 안테나 입력 단자의 모습으로 가운데 포트만 급전을 시키고 나머지 포트는 종단시켰다. 그림 12(c)는 분배기를 포함한 선배열 구조를 나타내고 있다. 8개의 소자가 8분기 분배기 끝에 연결되어 하나의 선배열을 구성하며, 이때 선배열의 전류 분포는 테일러 분포를 갖도록 설계하였다[2]. 그림 12(d)는 제작된 밸



(a) 8×5 부배열
(a) 8×5 subarray

(b) 입력 단자
(b) Input port

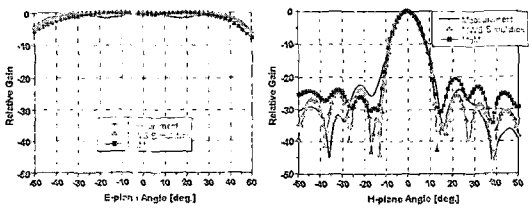


(c) 선 배열 구조
(c) Line array structure

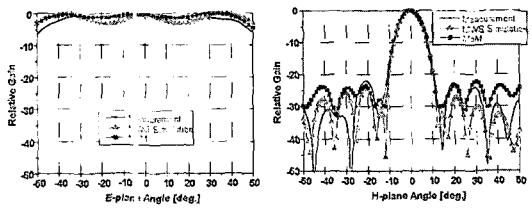
(d) 루프와 밸런 구조
(d) Loop and balun

그림 12. 제작된 8×5 부배열 안테나

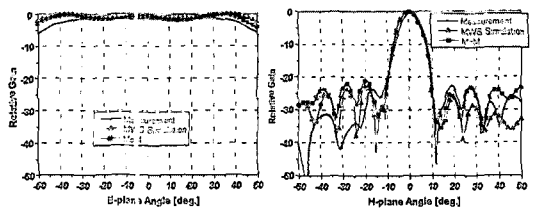
Fig. 12. Fabricated 8×5 subarray antenna.



(a) 하한 주파수
(a) Lower frequency



(b) 중심 주파수
(b) Center frequency



(c) 상한 주파수
(c) Upper frequency

그림 13. 계산, 시뮬레이션, 측정 결과의 비교

Fig. 13. MoM-calculated, MWS-simulated, and measured results.

런을 보여준다.

다음, 선배열 5개를 적층시키고 루프 뒷부분에 그라운드 판을 대어 그림 12(a)와 같은 8×5 루프 부배열 안테나를 제작하였다. 가운데 포트만 급전시켰기 때문에 8×5 부배열 안테나는 가운데 선배열만 급전한 형태가 된다. 그림 13은 측정 결과를 MWS와 모멘트 법 결과들과 함께 비교한 것을 보여주고 있다. E-면 특성은 세 그래프가 잘 일치하였고, H-면 방향에서 약간의 차이를 보였다. 이는 MoM 계산시 급전 부분에서 밸런과 분배기 부분은 고려하지 않았으며, 또한 루프 안테나의 입력단에 이상적인 180° 위상차를 주어 계산했기 때문으로 판단된다.

Ⅵ. 결 론

본 논문에서는 능동형 다기능 레이더에 적용 가능한 직사각형 루프 안테나를 제안하고 방사 패턴 특성을 고찰하였다. MWS를 이용하여 얻은 시뮬레이션 결과들을 검증하기 위해 RWG 모멘트 법을 고찰하여 본 논문 안테나 구조에 대해 프로그램을 개발하였다. 단일 소자에서 MoM 결과 및 MWS 시뮬레이션 결과를 비교하였으며 8×5 부배열 안테나를 설계한 뒤 조향 소자 패턴을 비교하였다. 마지막으로 8×5 루프 부배열 안테나를 5개의 선배열 형태로 제작하여 조향 소자 패턴을 측정하였다. MWS 시뮬레이션, 모멘트 법, 그리고 실험 결과를 비교하였으며 이 세 결과들은 서로 잘 일치하였다.

참 고 문 헌

[1] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design (2nd Ed.)*, John Wiley & Sons Inc., pp. 205-209, 1998.

[2] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design (2nd Ed.)*, John Wiley & Sons Inc., pp. 358-368, 1997.

[3] M. A. R Gunston, *Microwave Transmission-Line Impedance Data*, Van Nostrand Reinhold Co., 1972.

[4] R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, John Wiley & Sons Inc. 1998.

[5] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, "Electomagnetic sattering by surfaces of arbitrary shape", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, no. 3, pp. 409-418, May 1982.

[6] S. N. Makarov, *Antenna and EM Modeling with MATLAB*, John Wiley & Sons Inc., 2002.

[7] 유제우, 라동균, 김동석, 김찬홍, 박동철, "개방형 도파관 배열 안테나의 조향 소자 패턴 및 조향 임피던스에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 18(1), pp. 7-14, 2007년 1월.

구 한 이

2006년 2월: 충남대학교 정보통신공학부 (공학사)
2006년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이다, 위상배열 안테나, 전자파 수치해석

한 인 희

1997년 2월: 충남대학교 물리학과 (이학사)
1997년 12월~2001년 12월: (주)극동통신 선임연구원
2002년 1월~현재: (주)엠티지 부장
[주 관심분야] 안테나, 레이다

김 동 석

1989년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1991년 2월~1996년 5월: 국방과학연구소 연구원
1996년 5월~2001년 12월: (주)극동통신 연구소장
2002년 1월~현재: (주)엠티지 대표이사
[주 관심분야] 안테나, 레이다, 안테나 측정 시스템

박 동 철

1974년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1976년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
1984년 12월: Univ. of California, Santa Barbara (공학박사)
1977년~1978년: Ruhr University, Bochum, Germany 방문교수
1994년~1998년: IEEE MTT Korea Chapter Chairperson
1998년~2001년: IEEE EMC Korea Chapter Chairperson
2000년~2001년: 한국전자파학회 회장
1976년~현재: 충남대학교 전파공학과 교수
2005년 4월~현재: 대덕 Wireless 포럼 회장
[주 관심분야] Microwave and Millimeterwave Passive Components, Antennas, EMI/EMC

김 찬 홍

1991년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 2월: 포항공대 전자전기공학과 (공학석사)
1991년 3월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
2005년 3월~현재: 한국과학기술원 박사과정
[주 관심분야] 레이다, 위상배열 안테나, 급전기