

논문 2012-49-12-12

유한한 기판 크기가 2소자 E-평면 선형 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향

(Effect of a Finite Substrate Size on the Radiation Characteristics of Two-Element Linear E-plane Array Antennas)

윤 영 민*, 김 부 균**

(Young-Min Yoon and Boo-Gyoun Kim)

요 약

유한한 기판 크기가 2소자 E-평면 마이크로스트립 패치 선형 위상 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 서로 다른 유전상수를 가지는 기판을 이용하여 2소자 E-평면 배열 안테나의 기판 크기에 따른 평균 능동소자패턴 특성을 분석하고 빔 주사각도에 따른 배열 안테나의 방사패턴 특성을 분석하였다. 전산모의 실험 결과 E-평면상에 배열된 2소자 배열안테나의 방사패턴은 주로 E-평면 기판 가장자리에서 회절되어 방사되는 필드에 의해 결정되며 안테나 소자 간 상호결합으로 인한 기생 방사가 배열 안테나의 방사패턴에 미치는 영향은 상대적으로 작게 나타났다. 안테나 소자 중심에서 E-평면 방향 기판 가장자리까지의 거리가 $0.35 \lambda_0$ 일 때 배열 안테나의 방사패턴 특성이 가장 향상되었다.

Abstract

The effect of a finite substrate size on the radiation characteristics of a two-element linear E-plane array antenna using microstrip patch antennas is investigated. The average active element pattern characteristics of two-element E-plane array antennas printed on different dielectric constant substrates with various substrate sizes and element spacings are analyzed. Using the average active element pattern, the radiation pattern characteristics of the array antenna versus scan angle is analyzed. The simulation results show that the diffracted fields of surface waves from substrate edges have a significant effect on the radiation characteristics of a 2-element E-plane array antenna. The distance between the center of patch antenna and the substrate edges on the E-plane for the enhancement of radiation characteristics of the array antenna is about $0.35 \lambda_0$.

Keywords: Microstrip patch antenna, phased array antenna, finite grounded substrate, mutual coupling, radiation pattern.

I. 서 론

마이크로스트립 패치 안테나를 단위 안테나로 이용

하는 위상 배열 안테나는 수평방향으로 방사되는 필드(field)와 기판을 따라 전달되는 표면파(surface wave)에 의한 상호결합 현상으로 인하여 방사 특성이 저하될 수 있다^[1]. 마이크로스트립 패치 안테나를 프론트엔드 모듈과 집적시키기 위해 유전상수가 높은 기판을 사용하거나 대역폭을 향상시키기 위해 두꺼운 기판을 사용할 경우 접지된 유전체 기판을 따라 진행되는 표면파의 크기가 커지기 때문에 상호결합이 크게 발생한다^[2]. 안테나 간의 상호결합을 줄이기 위한 방법으로 표면파의

* 학생회원, ** 평생회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0023144)

접수일자: 2012년9월27일, 수정완료일: 2012년11월23일

전파를 억제시키는 EBG (electromagnetic bandgap) 구조^[3-4] 또는 DGS (defected ground structure)에^[5-6] 대한 연구 내용이 다수 발표되었다. 이와 같은 연구에서는 배열 안테나를 구성하는 안테나 소자 사이에 EBG 구조 또는 DGS를 삽입하여 접지된 유전체 기판을 따라 진행되는 표면파를 차단함으로써 안테나 소자 사이의 상호결합을 억제시키는 방법을 제시하였다. 그러나 대부분의 EBG 구조 또는 DGS를 이용하여 상호결합을 억제시키는 연구에서 기판 가장자리에서 발생하는 회절은 크게 고려되지 않았다.

현대 통신 시스템의 요구사항을 만족시키기 위한 기저국용 배열 안테나 또는 자동차에 사용되는 배열 안테나는 안테나 소자의 수가 적기 때문에 배열 안테나의 방사 패턴이 기판 가장자리에서의 회절에 의해 크게 영향을 받을 수 있다. 최근 기판 가장 자리에서 회절되는 필드를 차단하여 단일 패치 안테나의 방사 특성을 향상시키는 연구 내용이 발표되었지만^[7] 배열 안테나의 경우 기판 가장자리에서의 회절을 고려하는 내용의 연구는 찾아보기 힘들다. 따라서 기판 가장자리에서 회절이 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향을 분석하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 마이크로스트립 사각 패치 안테나를 이용하여 유한한 기판 크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나를 설계하고 기판 크기를 변화시켜 가며 기판 가장자리의 회절이 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향을 전산모의 실험을 통해 살펴보았다. 또한 단위 안테나 간의 상호결합으로 인한 기생방사가 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향도 함께 분석하였다. 전산모의에는 Ansys 사의 HFSS (High Frequency Structure Simulator)가 이용되었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II 장에서는 서로 다른 유전상수를 가지는 기판을 이용하여 2소자 E-평면 선형 배열 안테나의 기판 크기에 따른 평균 능동소자패턴 특성을 분석한다. 제 III 장에서는 기판 크기에 따른 단위 안테나 사이의 상호결합 특성을 살펴보고 상호결합으로 인한 기생방사가 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향을 살펴본다. 제 IV 장에서는 2소자 E-평면 배열 안테나의 평균 능동소자패턴을 이용하여 빔 주사각도에 따른 배열 안테나의 방사패턴 특성을 분석한다. 마지막으로 제 V 장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 기판 크기에 따른 능동소자패턴

1. 능동소자패턴

마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 배열 안테나 설계 시 유전상수가 크거나 두꺼운 기판을 사용하는 경우 접지된 유전체 기판을 따라 진행되는 표면파의 크기는 커진다. 표면파는 단위 안테나 간의 상호결합을 발생시키거나 기판 가장자리에서 회절되어 배열 안테나의 방사 특성을 저하시킬 수 있다. 본 장에서는 유전상수가 서로 다른 기판을 이용하여 표면파의 크기가 큰 경우와 작은 경우 2소자 E-평면 배열 안테나의 기판 크기에 따른 단위 안테나의 평균 능동소자패턴 (active element pattern: AEP) 특성을 살펴보았다.

능동소자패턴은 하나의 안테나 소자만 급전시키고 나머지 다른 안테나 소자는 정합된 부하로 중단시킨 경우의 방사패턴으로 안테나 간 상호결합 효과를 포함하는 방사패턴이다^[8]. 배열 안테나의 방사패턴은 각 안테나의 AEP와 배열 요소 (array factor: AF)와의 곱으로 정확히 표현되기 때문에 AEP를 분석하는 것은 배열 안테나의 방사패턴을 예측하는데 있어 중요하다. 안테나 소자의 수가 매우 많은 배열 안테나의 경우 중심 안테나 소자의 AEP는 안테나 소자의 개수가 무한개인 배열 안테나의 단위 안테나가 가지는 AEP와 매우 흡사하며, 모든 안테나 소자의 AEP를 중심안테나 소자의 AEP 또는 평균 AEP로 대체하여 배열 요소와 곱함으로써 위상 배열 안테나의 방사패턴 특성을 높은 정확도로 빠르

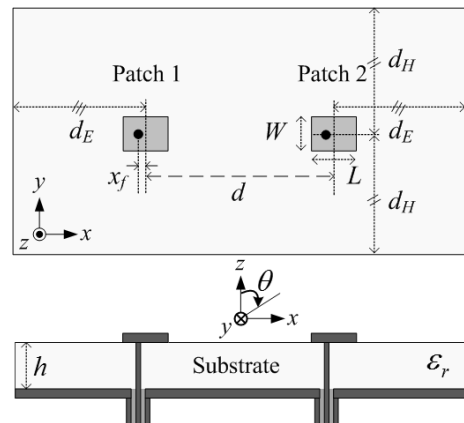


그림 1. 동축 프로브 급전 마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 2소자 E-평면 배열 안테나의 구조도
 Fig. 1. Schematic diagram of a two-element E-plane array antenna using a probe-fed microstrip patch antenna.

게 예측할 수 있다^[8-9]. 안테나 소자의 개수가 적은 경우에도 중심안테나 소자의 AEP 또는 평균 AEP로 모든 안테나 소자의 AEP를 대체하여 비교적 높은 정확도로 배열 안테나의 방사패턴 특성을 예측할 수 있다^[10].

그림 1에는 동축 프로브 급전 마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 2소자 E-평면 배열 안테나의 구조도를 보인다. 그림 1에서 단위 패치 안테나의 길이와 폭은 각각 L 과 W , 패치 안테나 중심에서 동축 프로브 급전 위치까지의 거리는 x_f 로 나타내었다. 논문 기술의 편의를 위해 두 패치 안테나 소자의 중심 간 거리는 d , 패치 안테나 소자의 중심에서 E-평면(x - z 평면) 방향 기관 가장자리까지의 거리는 d_E , H-평면(y - z 평면) 방향 기관 가장자리까지의 거리는 d_H 로 나타내었다. 본 논문에서는 유전상수가 서로 다른 기관을 이용하여 동작 주파수가 5 GHz 인 마이크로스트립 패치 안테나를 설계하였다. 설계에 사용된 기관은 유전상수가 각각 2.2와 10.8 인 Taconic 사의 TLY-5와 CER-10으로 기관의 두께는 3.2mm로 동일하다. 유전상수가 10.8 (2.2) 인 CER-10 (TLY-5) 기관을 이용하여 설계한 5 GHz 마이크로스트립 패치 안테나의 패치 크기는 $L \times W = 7.2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ ($18 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$)이고 $x_f = 1.12 \text{ mm}$ (3.8 mm)이다.

그림 2는 마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 2소자 배열 안테나에서 여러 가지 방사 원으로 구성되는 패치 안테나 1의 E-평면 능동소자패턴 개념도

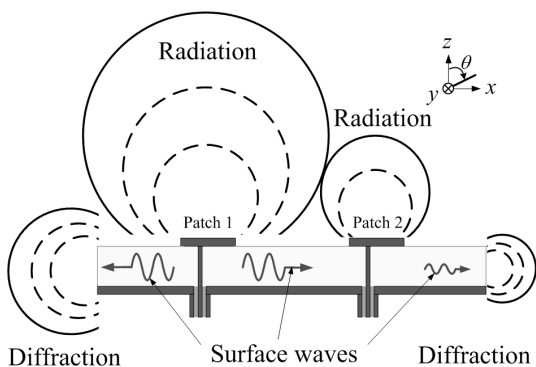


그림 2. 마이크로스트립 패치 안테나를 이용한 2소자 배열 안테나에서 여러 가지 방사 원으로 구성되는 패치 안테나 1의 E-평면 능동소자패턴 개념도

Fig. 2. Schematic diagram of an E-plane active element pattern composed of various radiation sources for patch antenna 1 of a two-element E-plane array antenna using a probe-fed microstrip patch antenna.

패치 안테나 1의 E-평면 능동소자패턴 개념도이다. 패치 안테나 1의 AEP는 직접 급전된 패치 안테나 1의 방사, 기관 가장자리에서의 회절에 의한 방사, 상호결합에 의한 인접 패치 안테나 2의 기생방사의 합으로 결정된다. 유전상수가 작고 얇은 기관을 이용하는 경우에는 표면파의 크기가 작기 때문에 패치 안테나 1의 AEP는 주로 직접 급전된 패치 안테나 1의 방사에 의해 결정된다. 그러나 유전상수가 크고 두꺼운 기관을 이용하는 경우에는 표면파의 크기가 크기 때문에 그림 2의 세 가지 주요 방사 원 간의 간섭 현상이 패치 안테나 1의 AEP를 결정한다. 주요 방사 원 간에 발생할 수 있는 상쇄 간섭은 AEP에 딥 (dip)을 발생시킬 수 있다.

안테나 소자의 수가 매우 많은 배열 안테나의 경우 기관 가장자리에서 발생하는 회절현상은 배열의 가장자리 부근에 위치한 단위 안테나의 AEP에 큰 영향을 주지만 배열의 중심 부근에 위치한 단위 안테나의 AEP에 미치는 영향은 크지 않다. 그러나 안테나 소자의 수가 적은 경우 기관 가장자리에서 발생하는 회절 현상이 배열 안테나를 구성하는 모든 단위 안테나의 AEP에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 기관 크기에 따른 단위 안테나의 AEP 해석은 안테나 소자의 수가 적은 배열 안테나의 방사 특성을 해석하는데 있어 중요하다.

2. 기관 크기에 따른 평균 AEP

평균 AEP를 이용하여 기관 크기에 따른 2소자 E-평면 배열 안테나의 방사패턴 특성을 살펴본다. 접지된 유전체 기관을 따라 진행하는 표면파는 주로 E-평면 방향으로 진행하기 때문에 E-평면 방향 기관 크기가 배열 안테나의 방사패턴에 미치는 영향이 H-평면 방향 기관 크기보다 크므로 d_H 를 $0.5 \lambda_0$ 로 고정시키고 d_E 에 따른 평균 AEP 변화를 살펴보았다. 여기서 λ_0 는 공기중에서의 파장을 나타낸다. 안테나 소자를 E-평면상에 배열하였으므로 E-평면 방사패턴 특성만을 고려하였다. 기관 크기에 따른 평균 AEP의 특성을 살펴보기에 앞서 평균 AEP에서 발생될 수 있는 딥의 위치와 크기에 대한 정의를 그림 3에 보인다.

그림 3에서 딥의 위치는 딥의 최소 이득이 발생하는 각도를 나타내고 딥의 크기는 인접 첨두 이득의 평균값과 딥의 최소 이득과의 차이로 표현하였다. 유전상수가 각각 2.2와 10.8 인 기관을 이용하여 설계한 2소자 E-평면 배열 안테나의 기관 크기 d_E 를 변화시켜가며 평균

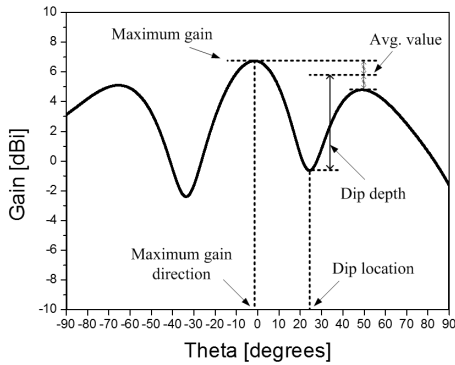


그림 3. 평균 AEP에서 나타나는 딥의 위치와 크기
Fig. 3. Dip location and depth in an average AEP.

AEP에서 나타나는 딥의 위치와 크기 그리고 최대 이득이 발생하는 각도와 크기를 전산모의 하였다. 이때, 딥은 $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ 에서 발생하는 경우만을 고려하였다.

기판 크기가 작을 경우 단위 안테나의 공진주파수 변화가 발생하지 않는 최소 기판 크기를 살펴보고 이보다 큰 기판 크기에서 평균 AEP의 방사 특성을 분석하였다. $d_H = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 기판 크기 d_E 를 패치 가장자리에서부터 $0.01 \lambda_0$ 간격으로 증가시키며 공진주파수 변화가 2%보다 작아지는 최소 기판 크기 d_L 을 살펴 보았다. 또한 $d_E = 0.35 \lambda_0$ 인 경우 기판 크기 d_H 를 패치 가장자리에서부터 $0.01 \lambda_0$ 간격으로 증가시키며 공진주파수 변화가 2%보다 작아지는 최소 기판 크기 d_W 를 살펴 보았다. 여기서 d_L 과 d_W 는 각각 E-평면과 H-평면상의 패치 가장자리에서 기판 가장자리까지의

표 1. 2 소자 E-평면 배열 안테나에서 단위 안테나의 공진 주파수 변화가 2% 보다 작은 최소 기판 크기

Table 1. Minimum substrate sizes at which the resonant frequency shift of the antenna elements of a 2-element E-plane array antenna occurs less than 2%.

유전체 기판	ΔL [λ_0]	ΔW [λ_0]	d [λ_0]	공진주파수 변화가 2% 보다 작은 최소 기판 크기 [λ_0]	
				$d_H = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 d_L	$d_E = 0.35 \lambda_0$ 인 경우 d_W
TLY-5	0.03	0.03	0.5	0.03	0.01
			0.7	0.03	0.01
CER-10	0.02	0.02	0.5	0.04	0.02
			0.7	0.04	0.02

거리이다. 표 1에 2 소자 E-평면 배열 안테나에서 단위 안테나의 공진 주파수 변화가 2%보다 작은 최소 기판 크기를 보인다.

표 1에서 ΔL 과 ΔW 는 프링징 필드(fringing field)에 의해 증가된 유효 패치 길이와 폭이다^[11]. 표 1에서 $d_H = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 공진주파수 변화가 2% 보다 작은 E-평면 방향 최소 기판 크기 d_L 은 유전상수가 2.2 인 TLY-5 기판의 경우 ΔL 보다 작을 때로 나타났으며 유전상수가 10.8 인 CER-10 기판의 경우 $2\Delta L$ 보다 작을 때로 나타났다. 공진주파수 변화가 2% 보다 작은 최소 기판 크기 d_W 는 TLY-5 기판의 경우 $\Delta W/3$ 보다 작을 때로 나타났으며 유전상수가 10.8 인 CER-10 기판의 경우 ΔW 보다 작을 때로 나타났다. 유전 상수가 큰 경우가 유전 상수가 작은 경우보다 공진주파수 변화가 2% 보다 작은 최소 기판 크기가 더 큼을 알 수 있다. 그 이유는 유전 상수가 큰 경우 기판 가장자리에서 반사되는 표면파의 크기가 더 크기 때문으로 생각된다. 또한 E-평면 방향으로 진행하는 표면파의 크기가 H-평면 방향보다 크기 때문에 유전상수와 관계없이 d_L 이 d_W 보다 크게 나타남을 알 수 있다. 표 1의 결과로부터 패치 가장자리에서 기판 가장자리까지의 거리가 E-평면 방향으로 $2\Delta L$, H-평면 방향으로 ΔW 보다 클 때 두께가 3.2 mm인 TLY-5와 CER-10 기판을 이용한 2 소자 E-평면 배열 안테나의 공진주파수가 기판 크기에 따라 크게 변화하지 않음을 알 수 있다.

표면파는 패치안테나의 공진모드에서 여기되어 E-평면 방향 기판 가장자리로 진행한 후 반사되거나 회절된다. E-평면 방향 패치 가장자리에서 기판 가장자리까지의 거리 ℓ 을 진행하는 동안 발생하는 표면파의 위상 변화 ($\beta_{sw}\ell$)가 π 보다 커지는 경우 패치에서 방사되는 필드와 기판 가장자리 회절에 의해 방사되는 필드가 서로 역위상(out of phase)이 되어 broadside 방향에서 상쇄간섭을 일으킬 수 있다^[12]. 여기서, β_{sw} 는 접지된 유전체 기판을 따라 진행하는 TM_0 표면파의 전파 상수이다. $\beta_{sw}\ell$ 이 π 가 되는 기판 크기 d_E 를 기준으로 기판 크기 d_E 에 따른 평균 AEP의 특성을 살펴 보았다. 두께가 3.2 mm인 TLY-5와 CER-10 기판을 이용하는 경우 5GHz 표면파의 패치 가장자리에서 기판 가장자리까지의 위상 변화 $\beta_{sw}\ell$ 이 π 가 되는 기판 크기 d_E

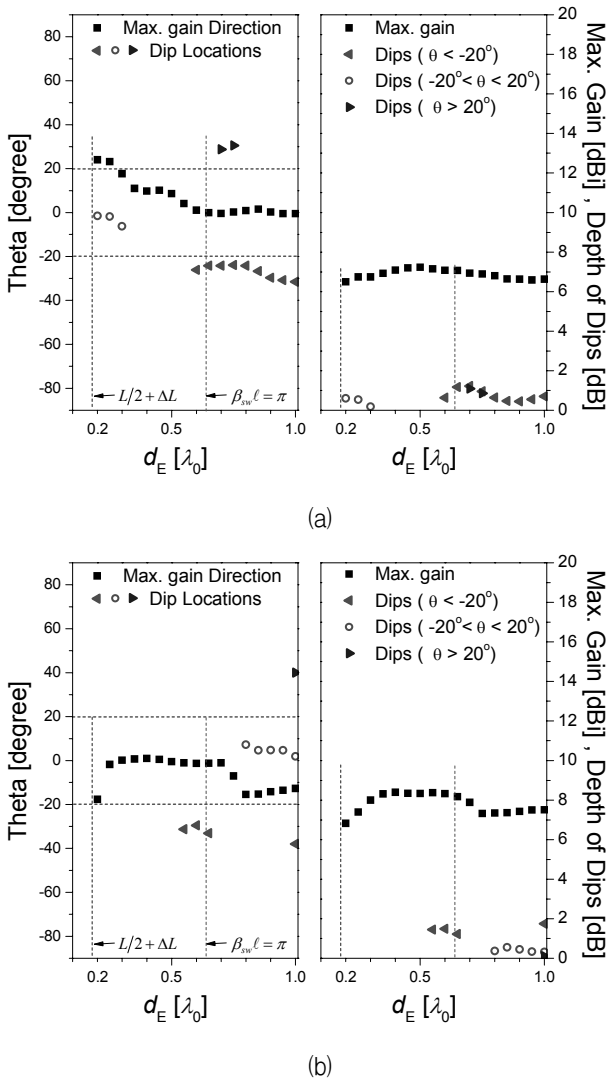


그림 4. 유전상수가 2.2 인 경우 기관 크기 d_E 를 변화시켜가며 구한 2 소자 E-평면 배열 안테나의 평균 능동소자패턴에서 발생하는 dips의 위치와 크기, 그리고 최대 이득이 발생하는 각도와 최대 이득 (a) $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우, (b) $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우

Fig. 4. Location and depth of the dips, and maximum gain direction and gain occurred in the average AEP of the two-element E-plane array antenna printed on the TLY-5 substrate with $\epsilon_r = 2.2$ versus d_E . (a) in the case of $d = 0.5 \lambda_0$, (b) in the case of $d = 0.7 \lambda_0$.

는 각각 $0.64 \lambda_0$ 와 $0.51 \lambda_0$ 이다.

그림 4에는 유전상수가 2.2 이고 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 기관 크기 d_E 를 $0.2 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 까지 변화시켜가며 구한 2 소자 E-평면 배열 안테

나의 평균 능동소자패턴에서 발생하는 dips의 위치와 크기, 그리고 최대 이득이 발생하는 각도와 크기를 보인다. 그림 4에 d_E 가 $L/2 + \Delta L$ 인 지점과 $\beta_{sw} \ell$ 이 π 가 되는 기관 크기 d_E 를 함께 도시하였다. 그림 4에서 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 d_E 가 $0.3 \lambda_0$ 보다 작을 때 d_E 가 감소함에 따라 최대 이득이 감소함을 볼 수 있다. 그 이유는 d_E 가 감소함에 따라 접지 평면의 크기가 감소하기 때문으로 생각된다.

그림 4(a)에서 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 인 경우 d_E 가 $0.6 \lambda_0$ 보다 커짐에 따라 -30° 근처에서 2 dB 미만의 크기를 가지는 dips이 발생하였다. 그림 4(b)에서 안테나 소자 간 간격이 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 d_E 가 $0.55 \lambda_0$ 보다 클 때 -30° 와 5° 근처에서 2 dB 미만의 크기를 가지는 dips이 발생하였다. 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 d_E 가 $\beta_{sw} \ell$ 이 π 가 되는 기관 크기 ($0.64 \lambda_0$)보다 클 때 크기가 작은 dips이 나타났다. 패치 안테나의 직접 방사사와 기관 가장자리 회절에 의한 방사 간섭으로 인해 dips이 발생되기 시작하는 기관 크기 d_E 가 $\beta_{sw} \ell$ 이 π 가 되는 기관 크기와 유사함을 알 수 있다.

유전상수가 작은 경우 패치 안테나로부터 여기 되는 표면파의 크기가 작기 때문에 평균 AEP에서 나타나는 dips의 크기는 작게 나타났다. 그림 4에서 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 기관 크기 d_E 가 $0.3 \lambda_0 < d_E < 0.55 \lambda_0$ 일 때 평균 AEP의 방사 특성이 가장 좋게 나타났다.

그림 5에는 유전상수가 10.8 이고 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 기관 크기 d_E 를 $0.1 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 까지 변화시켜가며 구한 2 소자 E-평면 배열 안테나의 평균 능동소자패턴에서 발생하는 dips의 위치와 크기, 그리고 최대 이득이 발생하는 각도와 크기를 보인다. 그림 5에서 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 d_E 가 $0.3 \lambda_0$ 보다 작을 때 d_E 가 감소함에 따라 최대 이득이 감소함을 볼 수 있다.

그림 5(a)에서 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 인 경우 d_E 가 $0.4 \lambda_0$ 보다 커짐에 따라 여러 개의 크기가 큰 dips이 발생됨을 볼 수 있다. 그림 5(b)에서 안테나 소자 간 간격이 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모든 기관 크기에서 dips이 발생하며 d_E 가 $0.4 \lambda_0$ 보다 클 때 dips의 크기가 크고 dips의 개

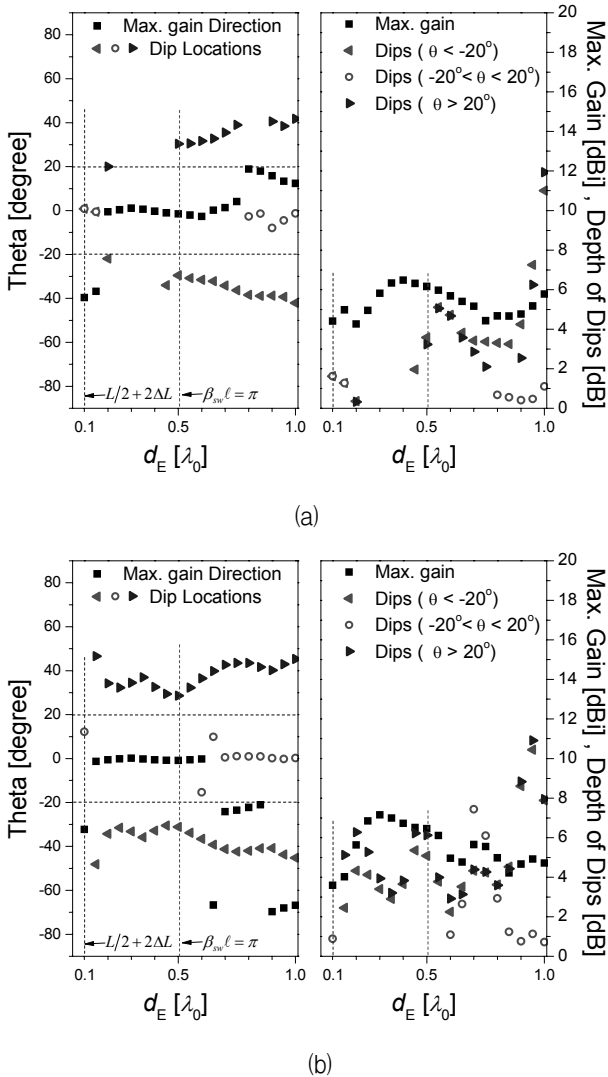


그림 5. 유전상수가 10.8 인 경우 기판 크기 d_E 를 변화시켜가며 구한 2소자 E-평면 배열 안테나의 평균 능동소자패턴에서 발생하는 dips의 위치와 크기, 그리고 최대 이득이 발생하는 각도와 최대 이득

(a) $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우, (b) $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우

Fig. 5. Location and depth of the dips, and maximum gain direction and gain occurred in the average AEP of the two-element E-plane array antenna printed on the CER-10 substrate with $\epsilon_r = 10.8$ versus d_E .

(a) in the case of $d = 0.5 \lambda_0$,

(b) in the case of $d = 0.7 \lambda_0$.

수도 증가하는 것을 볼 수 있다. 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 d_E 가 $\beta_{sw}\ell$ 이 π 가 되는 기판 크기 ($0.51 \lambda_0$) 보다 커질 때 dips의 개수와 크기가 증가함을 볼 수 있다. 유전상수가 큰 경우 패치 안테나

표 2. TLY-5 와 CER-10을 이용한 2소자 E-평면 배열 안테나에서 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우와 나쁜 경우의 기판 크기

Table 2. Simulated substrate sizes with good and bad average AEP characteristics for the 2-element E-plane array antennas printed on TLY-5 and CER-10 substrates, respectively.

유전체 기판	ϵ_r	$d [\lambda_0]$	기판 크기 $d_E [\lambda_0]$			
			$\frac{L}{2} + d_L$	방사특성이 좋은 경우	$\beta_{sw}\ell = \pi$	방사특성이 나쁜 경우
TLY-5	2.2	0.5	0.18	0.35	0.64	0.70
		0.7	0.18	0.35	0.64	1.00
CER-10	10.8	0.5	0.10	0.35	0.51	1.00
		0.7	0.10	0.35	0.51	0.95

로부터 여기 되는 표면파의 크기가 크기 때문에 기판 크기 d_E 에 따라 평균 AEP에서 나타나는 dips의 크기가 매우 크게 나타났다.

그림 5에서 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 기판 크기 d_E 가 $0.3 \lambda_0 < d_E < 0.4 \lambda_0$ 일 때 dips의 개수와 크기가 모두 작아 평균 AEP의 방사 특성이 가장 좋게 나타났다.

표 2에는 TLY-5와 CER-10을 이용한 2소자 E-평면 배열 안테나에서 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우와 나쁜 경우의 기판 크기 d_E 를 정리하였다. 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 (dips의 개수와 크기가 가장 작은 경우)에 해당하는 기판크기 d_E 는 모든 경우 $0.35 \lambda_0$ 근처에서 나타났으며 방사 특성이 나쁜 경우 (dips의 개수와 크기가 가장 큰 경우)는 기판크기 d_E 가 $\beta_{sw}\ell = \pi$ 인 기판 크기보다 클 때 나타났다.

III. 기판 크기에 따른 상호결합

본 장에서는 유전상수가 서로 다른 기판을 이용하여 표면파의 크기가 큰 경우와 작은 경우 2소자 E-평면 배열 안테나의 기판 크기에 따른 단위 안테나 간 상호결합 크기 변화를 살펴보고 상호결합으로 인한 기생 방사가 2소자 E-평면 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 유전상수가 큰 경우와 작은 경우 기판 가장자리에서 반사되는 표면파가 상호결합에 미치는 영향을 알아보기 위하여 기판 크기에 따른 두 안테

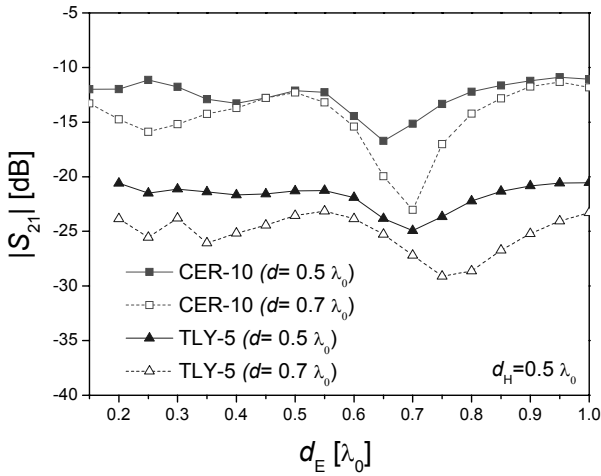


그림 6. $d = 0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 TLY-5 와 CER-10 기판을 이용하여 설계한 2 소자 E-평면 배열 안테나의 기판 크기 d_E 에 따른 단위 안테나 간 상호결합

Fig. 6. Mutual coupling between two antenna elements printed on the TLY-5 and CER-10 substrates for the quantity d of $0.5 \lambda_0$ and $0.7 \lambda_0$ versus the quantity d_E .

나 사이의 상호결합 크기 변화를 살펴보았다. 접지된 유전체 기판을 따라 진행되는 표면파는 주로 E-평면 방향으로 진행하기 때문에 E-평면 방향 기판 크기가 상호결합에 미치는 영향이 크므로 d_H 를 $0.5 \lambda_0$ 로 고정시키고 d_E 에 따른 배열 안테나의 방사패턴 변화를 살펴보았다.

그림 6에 $d = 0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 TLY-5 와 CER-10 기판을 이용하여 설계한 2 소자 E-평면 배열 안테나의 기판 크기 d_E 에 따른 단위 안테나 간 상호결합 크기를 비교하였다. 그림 6에서 유전상수가 큰 CER-10 기판을 이용하는 경우가 유전상수가 작은 TLY-5 기판을 이용하는 경우보다 상호결합 크기가 큰 것을 볼 수 있다. 또한 안테나 사이의 간격이 작을수록 상호결합 크기가 큰 것을 볼 수 있다. TLY-5 기판을 이용한 배열 안테나에서 두 안테나 사이의 상호결합이 최소가 되는 거리 $d_{E,min}$ 은 d 가 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 각각 $0.70 \lambda_0$ 와 $0.75 \lambda_0$ 로 나타났으며 CER-10 기판을 이용한 배열 안테나에서 두 안테나 사이의 상호결합이 최소가 되는 거리 $d_{E,min}$ 은 d 가 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 각각 $0.65 \lambda_0$ 와 $0.70 \lambda_0$ 로 나타났다. 그림 6에서 기판 크기 d_E 에 따라 상호결합이 최소가 되는 기판 크

표 3. d_H 가 $0.5 \lambda_0$ 인 경우 여러 가지 유전체 기판과 안테나 사이의 거리를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 단위 안테나 간 상호결합이 최소와 최대가 되는 기판 크기와 상호결합 크기

Table 3. $d_{E,min}$ and $d_{E,max}$, and $|S_{21}|$ for 2-element E-plane array antennas with various substrates and the distances between antenna elements for a fixed d_H of $0.5 \lambda_0$.

유전체 기판	d [λ_0]	d_H [λ_0]	상호결합이 최소인 경우		상호결합이 최대인 경우	
			$d_{E,min}$ [λ_0]	$ S_{21} $ [dB]	$d_{E,max}$ [λ_0]	$ S_{21} $ [dB]
TLY-5	0.5	0.5	0.70	-24.94	1.00	-20.54
	0.7	0.5	0.75	-29.10	0.55	-23.14
CER-10	0.5	0.5	0.65	-16.73	0.95	-10.88
	0.7	0.5	0.70	-23.04	0.95	-11.32

기 $d_{E,min}$ 은 인접안테나로 직접 전달되는 표면파 성분과 E-평면 방향 기판 가장자리에서 반사되어 인접 안테나로 결합되는 표면파 성분의 경로 차이로 인한 위상 차이가 180° 가 되는 기판 크기이다^[13]. 표 3에는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 d_E 에 따른 단위 안테나 간 상호결합이 최소와 최대가 되는 기판 크기 ($d_{E,min}$ 과 $d_{E,max}$)와 상호결합 크기 ($|S_{21}|$)를 정리하였다.

표 3으로부터 상호결합이 최소가 되는 기판 크기 d_E 는 $\beta_{sw}l = \pi$ 가 되는 기판 크기보다 큼을 알 수 있다. II 장에서 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 기판 크기는 d_E 가 $\beta_{sw}l = \pi$ 가 되는 기판 크기보다 작은 경우로 상호결합이 최소가 되는 기판 크기와 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 기판 크기가 일치하지 않게 나타났다. 그 이유는 상호결합의 영향이 감소하여도 기판 가장자리 회절에 의한 방사가 2 소자 E-평면 배열 안테나의 방사 특성을 저하시키기 때문이라 생각한다.

상호결합으로 인한 기생 방사와 기판 가장자리에서의 회절에 의한 방사 중에 배열 안테나의 방사패턴을 결정짓는 주요한 방사원이 무엇인지를 살펴보기 위해 상호결합이 가장 크게 나타나는 기판 크기에서 평균 AEP와 평균 고립소자패턴 (isolated element pattern: IEP)을 비교하였다. IEP는 급전되는 안테나 소자만 존재하는 경우의 방사패턴을 말한다.

그림 7은 패치로부터의 직접 방사와 기판 가장자리

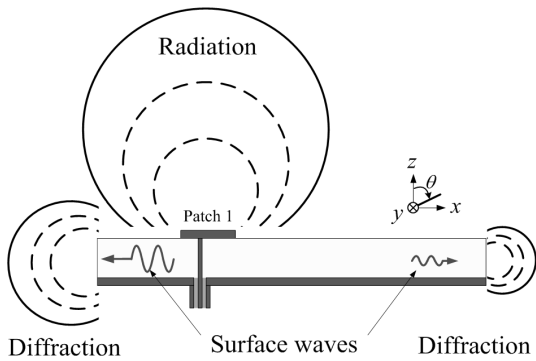


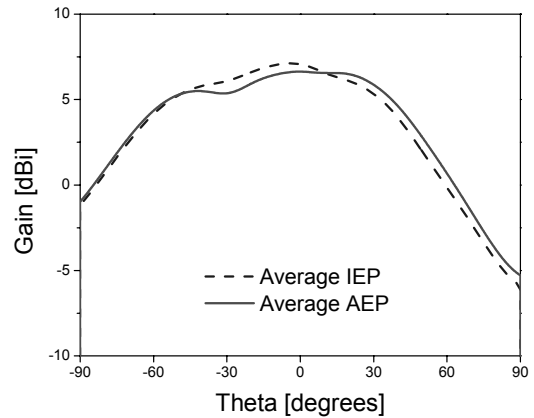
그림 7. 패치로부터의 직접 방사과 기판 가장자리에서의 회절에 의한 방사로 구성되는 패치 안테나 1의 E-평면 고립소자패턴 개념도

Fig. 7. Schematic diagram of an E-plane isolated element pattern composed of direct radiation from the patch and diffraction of surface waves from the substrate edges for patch antenna 1.

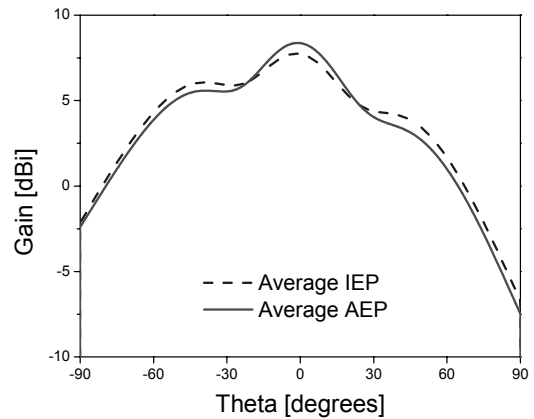
에서의 회절에 의한 방사로 구성되는 패치 안테나 1의 E-평면 고립소자패턴 개념도이다. 그림 2의 능동소자패턴은 직접 급전된 안테나 소자의 방사, 기판 가장자리에서의 회절에 의한 방사과 더불어 상호결합에 의한 인접 안테나 소자의 기생방사에 의하여 방사패턴이 결정되는데 비해 그림 7의 고립소자패턴은 인접 안테나의 영향을 받지 않기 때문에 패치에 의한 방사과 기판 가장자리에서 회절에 의한 방사의 합으로 방사패턴이 결정된다. 따라서 상호결합이 배열 안테나의 방사 특성에 미치는 영향은 평균 AEP와 평균 IEP를 비교 도시하여 분석할 수 있다.

그림 8에는 유전상수가 2.2 이고 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 표 3의 상호결합이 최대가 되는 기판 크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 E-평면 평균 AEP와 IEP를 보인다. 그림 8에서 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 상호결합 크기가 -20 dB 이하로 기생 방사에 의한 영향이 작기 때문에 평균 AEP는 평균 IEP와 비슷하게 나타났다. IEP는 패치로부터의 직접 방사과 기판 가장자리에서 회절에 의한 방사 간의 간섭 현상에 의해 주로 결정된다. 따라서 평균 AEP에서 보이는 작은 크기의 넓은 상호결합으로 인한 기생방사보다 기판 가장자리의 회절에 의한 방사에 의해 주로 발생하였음을 알 수 있다.

그림 9에는 유전상수가 10.8 이고 안테나 소자 간 간격이 $0.5 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 표 3의 상호결합이 최대가 되는 기판 크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의



(a)



(b)

그림 8. 유전상수가 2.2 인 경우 상호결합이 최대가 되는 기판 크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 E-평면 평균 AEP와 IEP (a) $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우, (b) $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우

Fig. 8. E-plane average AEP and IEP of the two-element E-plane array antenna printed on the TLY-5 with a substrate size for maximum mutual coupling.

(a) in the case of $d = 0.5 \lambda_0$,

(b) in the case of $d = 0.7 \lambda_0$.

E-평면 평균 AEP와 IEP를 보인다. 그림 9에서 평균 IEP를 살펴보면 패치로부터의 직접 방사과 기판 가장자리의 회절에 의한 방사간의 상쇄 간섭으로 인해 $\theta = \pm 40^\circ$ 근처에서 크기가 큰 dips 발생되었음을 볼 수 있다. 단위 안테나 간 상호결합이 큰 경우 배열 안테나의 방사패턴은 기판 가장자리 회절에 의한 방사뿐만 아니라 상호결합으로 인한 기생방사에 의해서도 영향을 받기 때문에 평균 AEP와 평균 IEP의 패턴 모양이 다르게 나타난다. 그림 9에서 상호결합 크기가 더 큰 $d = 0.5$

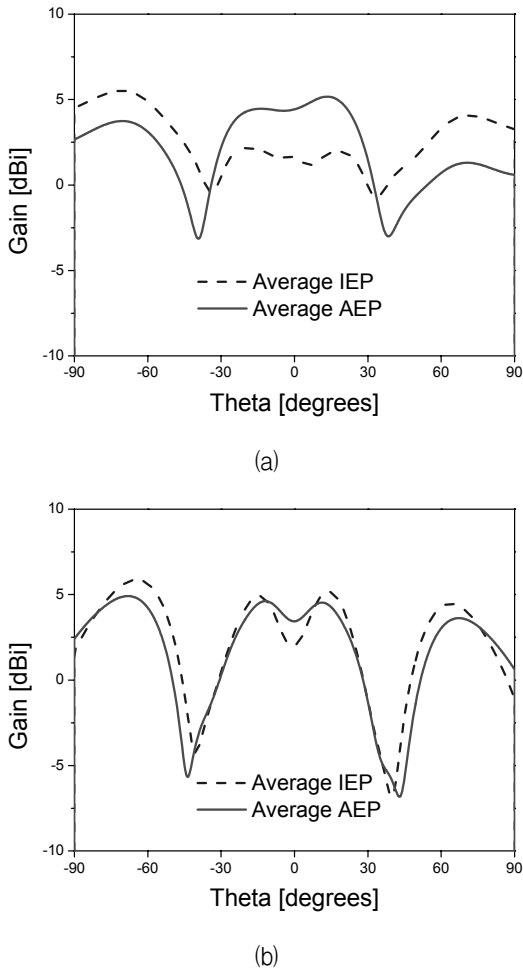


그림 9. 유전상수가 10.8 인 경우 상호결합이 최대가 되는 기판 크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 E-평면 평균 AEP와 IEP
(a) $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우, (b) $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우

Fig. 9. E-plane average AEP and IEP of the two-element E-plane array antenna printed on the CER10 with a substrate size for maximum mutual coupling.
(a) in the case of $d = 0.5 \lambda_0$,
(b) in the case of $d = 0.7 \lambda_0$.

λ_0 인 경우가 $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우보다 평균 AEP와 IEP 간의 패턴 모양 차이가 더 큼을 볼 수 있다. 그러나 그림 9에서 평균 AEP와 평균 IEP를 함께 비교해 볼 때 답의 크기 차이는 있어도 답이 발생하는 각도는 비슷하며 전체 패턴의 모양은 크게 다르지 않음을 볼 수 있다. 따라서 배열 안테나의 방사패턴에 주된 영향을 미치는 방사원은 상호결합으로 인한 기생방사보다 기판 가장자리의 회절에 의한 방사임을 알 수 있다.

그림 8과 9의 결과로부터 상호결합의 크기가 커질수

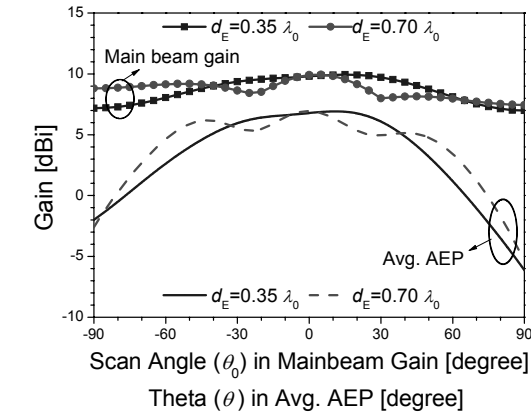
록 인접 안테나의 기생 방사로 인해 평균 AEP와 평균 IEP의 패턴 모양이 서로 다르게 나타남을 알 수 있다. 그러나 기생 방사가 전체 안테나의 방사패턴에 미치는 영향은 기판 가장자리에서 회절에 의한 방사가 전체 방사패턴에 미치는 영향보다 작게 나타났다. 안테나 소자의 개수가 2개인 유한한 기판크기를 가지는 E-평면 배열 안테나의 방사 특성은 상호결합 효과보다 가장자리 효과에 의해 주로 결정됨을 알 수 있다.

IV. 기판 크기에 따른 방사패턴 특성

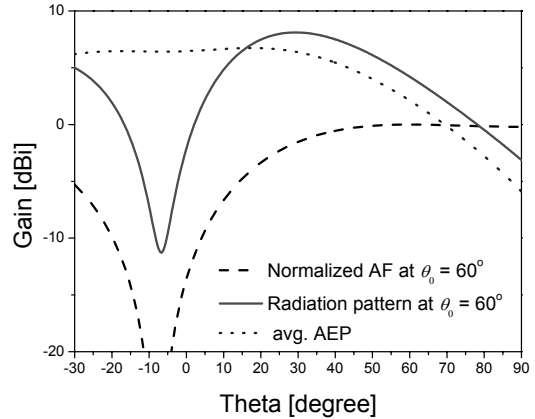
본 장에서는 표 2에서 보인 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우와 나쁜 경우의 기판크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득과 주 빔 방향 θ_m 을 평균 AEP와 함께 살펴본다. 여기서 빔 주사각도 θ_0 는 배열 요소의 최대 이득이 발생하는 각도이며 주 빔 방향 θ_m 은 배열 안테나의 주 빔 이득이 최대가 되는 각도이다.

1. 유전상수가 2.2인 기판

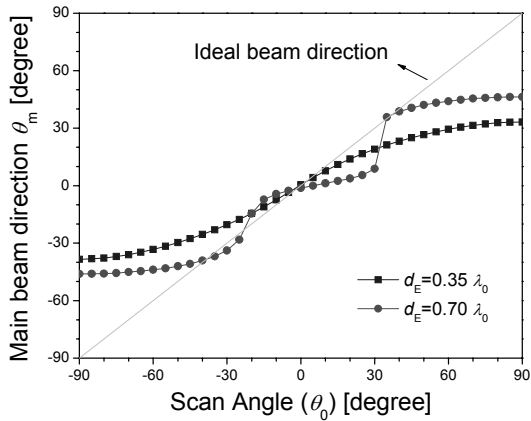
그림 10에 유전상수가 2.2이고 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 0.7 \lambda_0$)의 기판크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향 θ_m 과 θ 에 따른 평균 AEP를 보인다. Broadside 배열 안테나에서 주 빔의 반 전력 빔 폭(half power beam width: HPBW)은 안테나 소자의 수가 적을수록 단위 안테나 간 거리가 작을수록 증가한다. 또한 빔 주사 시 빔 주사각도 θ_0 가 커질수록 반 전력 빔 폭은 증가한다^[14]. 가장 기본적인 배열 구조인 2소자 배열 안테나는 배열 요소가 가지는 주 빔의 빔 폭이 매우 넓기 때문에 평균 AEP와 배열 요소의 곱으로 얻어지는 배열 안테나의 특성은 평균 AEP에 따라 크게 좌우된다. 그림 10(a)에서 $d_E = 0.35 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 모두 빔 주사각도에 따른 주 빔 이득의 변화는 평균 AEP의 이득 변화와 비슷함을 볼 수 있다. $d_E = 0.35 \lambda_0$ 인 경우에는 평균 AEP에서 답이 발생되지 않기 때문에 빔 주사각도에 따른 주 빔 이득 변화에서도 큰 답이 관찰되지 않는다. $d_E = 0.7 \lambda_0$ 인 경우에는 평균 AEP의 $\theta =$



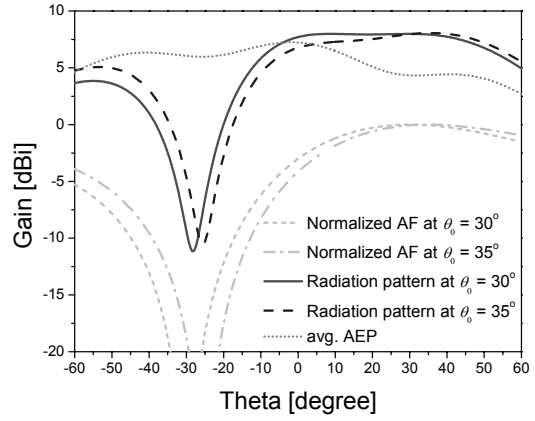
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 10. 유전상수가 2.2 이고 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 0.7 \lambda_0$)의 기판크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향과 θ 에 따른 평균 AEP
(a) 주 빔 이득과 평균 AEP, (b) 주 빔 방향 θ_m

Fig. 10. Main beam gain and direction versus scan angle θ_0 , and average AEP versus θ for the $0.5 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane antenna arrays printed on a TLY-5 substrate with the substrate sizes that correspond to good ($d_E = 0.35 \lambda_0$) and bad ($d_E = 0.7 \lambda_0$) cases of radiation characteristics in average AEP.
(a) main beam gain and average AEP,
(b) main beam direction θ_m .

$\pm 30^\circ$ 부근에서 덩이 발생되어 빔 주사각도가 $\theta_0 = \pm 30^\circ$ 근처일 때 주 빔 이득이 감소되고 주 빔 방향 θ_m 이 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 그림 10(a)에서 $|\theta_0|$ 가 약 50° 보다 큰 경우 기판 크기에 상관없이 평균 AEP

그림 11. 유전상수가 2.2 이고 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 $d_E = 0.35 \lambda_0, 0.7 \lambda_0$ 의 기판크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 평균 AEP와 특정 빔 주사각도에서의 방사패턴과 정규화된 배열 요소
(a) $d_E = 0.35 \lambda_0$ 이고 $\theta_0 = 60^\circ$ 인 경우,
(b) $d_E = 0.7 \lambda_0$ 이고 $\theta_0 = 30^\circ, 35^\circ$ 인 경우

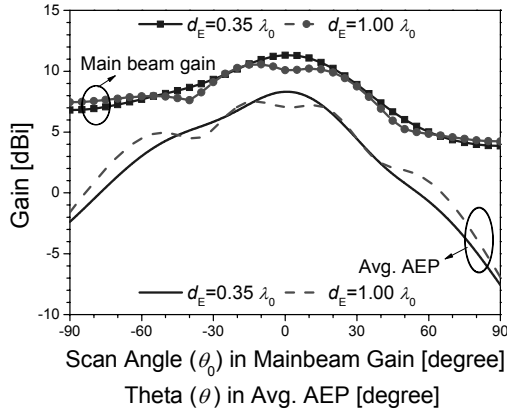
Fig. 11. Radiation pattern and normalized array factor at a particular scan angle, and average AEP for the $0.5 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane antenna arrays printed on a TLY-5 substrate with the substrate sizes of $d_E = 0.3 \lambda_0$ and $0.7 \lambda_0$.
(a) in the case of $d_E = 0.35 \lambda_0$ and $\theta_0 = 60^\circ$,
(b) in the case of $d_E = 0.7 \lambda_0$ and $\theta_0 = 30^\circ, 35^\circ$.

의 이득이 급격히 감소되며 이에 따라 빔 주사 오차가 증가하는 것을 그림 10(b)를 통해 확인할 수 있다. 주 빔 방향 θ_m 이 급격히 변화하는 이유는 그림 11을 이용하여 자세히 설명한다.

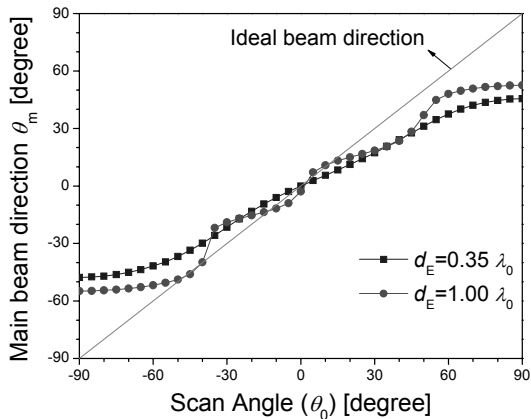
그림 11에는 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 0.7$

λ_0 의 기관크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 평균 AEP와 특정 빔 주사각도에서의 방사패턴과 정규화된 배열 요소를 보인다. 그림 11(a)는 $d_E = 0.35 \lambda_0$ 인

경우 평균 AEP와 $\theta_0 = 60^\circ$ 일 때 배열안테나의 방사패턴과 정규화된 배열 요소를 도시한 것이다. 정규화된 배열 요소는 $\theta = 60^\circ$ 에서 최대 이득을 가지지만 반 전력 빔 폭이 매우 넓다. 이에 비해 평균 AEP는 60° 보다 작은 각도에서 이득이 크기 때문에 배열 안테나의 방사패턴은 $\theta = 60^\circ$ 에서 최대 이득을 가지지 못하고 $\theta = 29.4^\circ$ 에서 최대 이득을 가지게 된다. 이에 따라 $\theta_0 = 60^\circ$ 일 때 주 빔 방향 θ_m 은 29.4° 가 되어 빔 주사각 오차는 30.6° 로 매우 크며 주 빔 이득은 $\theta = 29.4^\circ$ 에서 평균 AEP가 가지는 이득에 비례하여 크게 줄어들지 않음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 12. 유전상수가 2.2 이고 $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 1.0 \lambda_0$)의 기관크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향과 θ 에 따른 평균 AEP

(a) 주 빔 이득과 평균 AEP, (b) 주 빔 방향 θ_m

Fig. 12. Main beam gain and direction versus scan angle of θ_0 , and average AEP versus θ for the $0.7 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane array antennas printed on a TLY-5 substrate with the substrate sizes that correspond to good ($d_E = 0.3 \lambda_0$) and bad ($d_E = 1.0 \lambda_0$) cases of radiation characteristics in average AEP.

(a) main beam gain and average AEP,

(b) main beam direction θ_m .

그림 11(b)는 $d_E = 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP와 θ_0 가 30° 와 35° 일 때 배열안테나의 방사패턴과 정규화된 배열 요소를 도시한 것이다. 정규화된 배열 요소는 $\theta = 30^\circ$ 와 35° 에서 각각 최대 이득을 가지지만 반 전력 빔 폭이 매우 넓다. 이에 비해 평균 AEP는 $\theta = 28.8^\circ$ 에서 발생하는 딥으로 인해 $\theta = -0.4^\circ$ 와 40.7° 에서 이득 침투치를 가진다. 이에 따라 $\theta_0 = 30^\circ$ 일 때 주 빔 방향 θ_m 은 8.8° 가 되지만 $\theta_0 = 35^\circ$ 일 때 주 빔 방향 θ_m 은 35.8° 가 되어 θ_0 가 5° 증가될 때 θ_m 은 27° 증가된다.

그림 12에 $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 1.0 \lambda_0$)의 기관크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향 θ_m 과 θ 에 따른 평균 AEP를 보인다. 그림 12(a)에서 $d_E = 0.35 \lambda_0$ 인 경우 broadside 방향 근처에서의 주 빔 이득이 $d_E = 1.0 \lambda_0$ 인 경우에 비해 크며 빔 주사각도에 따른 주 빔 이득 변화에서 딥이 관찰되지 않음을 볼 수 있다. $d_E = 1.0 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP에서 나타나는 $\theta = -38^\circ, 2^\circ, 40^\circ$ 부근의 딥은 해당 각도 근처에서 주 빔 이득을 저하시키고 θ_0 에 따른 θ_m 변화를 증가시킨다.

표 4에는 유전상수가 2.2이고 $d = 0.5, 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우와 나쁜 경우의 기관크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 주요 방사 특성을 정리하여 보인다. 표 4에서 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 기관 크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나는 평균 AEP에서 딥이 발생하지 않으며 θ_0 에 따라 주 빔 이득이 지역적으로 최소가 되거나 빔 주

표 4. 유전상수가 2.2이고 $d = 0.5, 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우와 나쁜 경우의 기관크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 주요 방사 특성

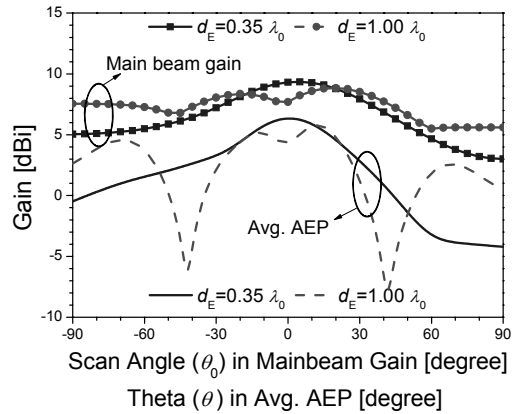
Table 4. Radiation characteristics of the 0.5 and $0.7 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane array antennas printed on a TLY-5 substrate with the substrate sizes that correspond to good and bad cases of radiation characteristics in average AEP.

유전체 기관	TLY-5			
	0.5		0.7	
$d [\lambda_0]$	0.5	0.7	0.5	0.7
평균 AEP의 방사특성	좋은 경우	나쁜 경우	좋은 경우	나쁜 경우
$d_E [\lambda_0]$	0.35	0.70	0.35	1.00
최대 주 빔 이득 [dBi]	9.9	9.9	11.3	10.6
평균 AEP에서 딤의 위치(크기) [degree(dB)]	-	-24.2(1.2) +28.8(1.1)	-	-38.0(1.7) +1.9(0.3)
주 빔 이득 지역 최소 각도(이득) [degree(dBi)]	-	-25.0(8.4) +30.0(8.0)	-	-40.0(7.63) 0.0(10.1)
빔 주사 오차 지역 최대 각도(오차) [degree(degree)]	-	-20.0(13.6) +30.0(27.0)	-	-40.0(17.9) +45.0(8.70)

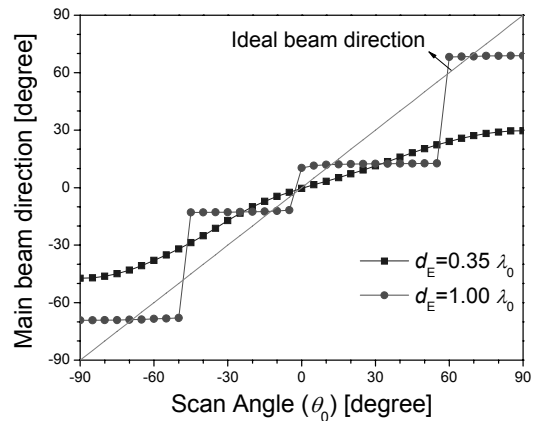
사 오차가 급격히 커지는 빔 주사 각도가 발생하지 않음을 볼 수 있다. 그러나 평균 AEP의 방사 특성이 나쁜 기관 크기를 가지는 경우에는 평균 AEP에서 딤이 발생하는 각도 근처에서 주 빔 이득이 감소하고 빔 주사 오차가 증가함을 볼 수 있다.

2. 유전상수가 10.8인 기관

그림 13에 유전상수가 10.8이고 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 1.0 \lambda_0$)의 기관크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향 θ_m 과 θ 에 따른 평균 AEP를 보인다. 그림 13(a)에서 $d_E = 0.35 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP에서 딤이 관찰되지 않으므로 빔 주사각에 따른 주 빔 이득 변화에서도 딤이 관찰되지 않는다. 그러나 평균 AEP의 이득이 broadside ($\theta = 0^\circ$) 방향에서 벗어날수록 크게 감소하여 θ_0 가 증가함에 따라 2소자 배열 안테나의 빔 주사 오차가 증가하는 것을 그림 13(b)를 통해 확인할 수 있다. $d_E = 1.0 \lambda_0$ 인 경우에는 평균 AEP의 $\theta = 0^\circ$ 와 $\pm 40^\circ$ 부근



(a)



(b)

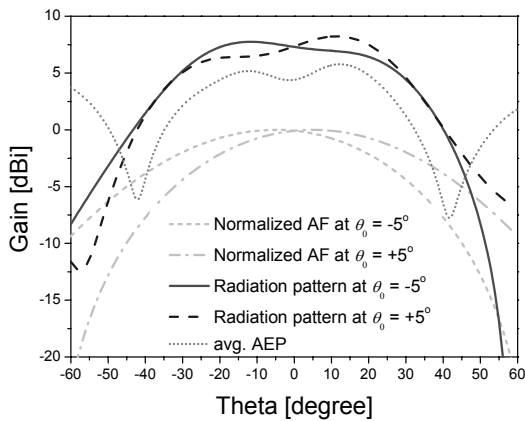
그림 13. 유전상수가 10.8 이고 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 1.0 \lambda_0$) 기관크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향과 θ 에 따른 평균 AEP

(a) 주 빔 이득과 평균 AEP, (b) 주 빔 방향 θ_m .
Fig. 13. Main beam gain and direction versus scan angle θ_0 , and average AEP versus θ for the $0.5 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane array antennas printed on a CER-10 substrate with the substrate sizes that correspond to good ($d_E = 0.35 \lambda_0$) and bad ($d_E = 1.0 \lambda_0$) cases of radiation characteristics in average AEP. (a) main beam gain and average AEP, (b) main beam direction θ_m .

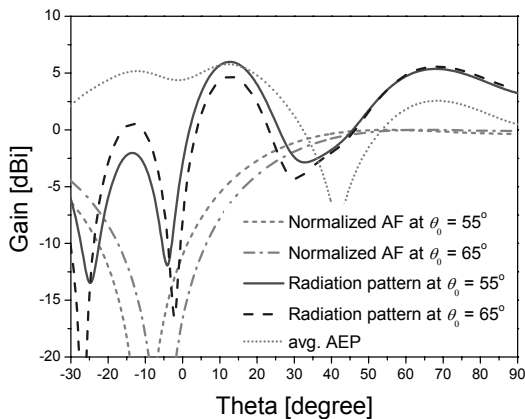
에서 큰 딤이 발생되므로 빔 주사각도가 $\theta_0 = 0^\circ$ 와 $\pm 40^\circ$ 근처로 주사될 때 주 빔 이득이 감소되고 θ_m 이 급격히 달라짐을 볼 수 있다. 그림 13(b)에서 $d_E = 1.0 \lambda_0$ 일 때 빔 주사각도 $\theta_0 = -50^\circ, 0^\circ, 60^\circ$ 인 경우 2소자 배열안테나

의 주 빔 방향 θ_m 이 급격하게 달라진 것을 볼 수 있는데 그 이유는 그림 14를 이용해 설명한다.

그림 14에는 유전상수가 10.8 이고 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 $d_E = 1.0 \lambda_0$ 의 기판크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 평균 AEP와 특정 빔 주사각도에서의 방사패턴과 정규화된 배열 요소를 보인다. 그림 14(a)는 평균 AEP와 $\theta_0 = \pm 5^\circ$ 일 때 배열안테나의 방사패턴과 정규화



(a)



(b)

그림 14. 유전상수가 10.8 이고 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 $d_E = 1.0 \lambda_0$ 의 기판크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 평균 AEP와 특정 빔 주사각도에서의 방사패턴과 정규화된 배열 요소
(a) $\theta_0 = \pm 5^\circ$ 인 경우, (b) $\theta_0 = 55^\circ, 65^\circ$ 인 경우

Fig. 14. Radiation patterns and normalized array factors at particular scan angles, and average AEP for the $0.5 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane array antennas printed on a CER-10 substrate with the substrate size d_E of $1.0 \lambda_0$.
(a) in the case of $\theta_0 = \pm 5^\circ$,
(b) in the case of $\theta_0 = 55^\circ, 65^\circ$.

된 배열 요소를 도시한 것이다. $\theta_0 = \pm 5^\circ$ 일 때 정규화된 배열 요소는 $\theta = \pm 5^\circ$ 에서 최대 이득을 가지며 평균 AEP는 $\theta = -1.3^\circ$ 에서의 값으로 인해 $\theta = -12.2^\circ$ 와 12.3° 에서 이득 첨두치를 가진다. 이에 따라 $\theta_0 = -5^\circ$ 일 때 θ_m 은 -11.7° 가 되지만 $\theta_0 = 5^\circ$ 일 때 θ_m 은 11.5° 가 되어 θ_0 가 10° 증가될 때 θ_m 은 23.2° 증가된다.

그림 14(b)는 평균 AEP와 $\theta_0 = 55^\circ$ 와 65° 일 때 배열안테나의 방사패턴과 정규화된 배열 요소를 도시한 것이다. $\theta_0 = 55^\circ$ 와 65° 일 때 정규화된 배열 요소는 $\theta = 55^\circ$ 와 65° 에서 최대 이득을 가지며 $\theta = 15^\circ$ 근처에서 이득이 급격하게 감소한다. 평균 AEP는 $\theta = 41.7^\circ$ 에서의 넓고 깊은 값으로 인해 $\theta = 12.3^\circ$ 와 68.4° 에서 이득 첨두치를 가진다. 이에 따라 $\theta_0 = 55^\circ$ 일 때 θ_m 은 12.7° 가 되지만 $\theta_0 = 65^\circ$ 일 때 θ_m 은 68.4° 가 되어 θ_0 가 10° 증가될 때 θ_m 은 55.7° 증가된다.

그림 15에는 유전상수가 10.8 이고 $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 0.95 \lambda_0$)의 기판크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향 θ_m 과 θ 에 따른 평균 AEP를 보인다. 그림 15(a)의 $d_E = 0.35 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP에서 값이 관찰되지 않고 빔 주사각에 따른 주 빔 이득 변화에서도 값이 관찰되지 않으며 $|\theta_0|$ 가 증가함에 따라 빔 주사 오차가 증가함을 볼 수 있다. $d_E = 0.95 \lambda_0$ 인 경우에는 평균 AEP의 $\theta = -43.7^\circ, -0.2^\circ, 42.9^\circ$ 에서 매우 큰 값이 발생되므로 빔 주사각도가 $\theta_0 = \pm 40^\circ$ 와 0° 근처에서 주 빔 이득이 저하되고 θ_0 에 따른 θ_m 의 변화가 매우 크게 나타났다.

표 5에는 유전상수가 10.8이고 $d = 0.5, 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우와 나쁜 경우의 기판크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나의 주요 방사 특성을 정리하여 보인다. 표 5에서 $d = 0.5 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 기판 크기를 가지는 2소자 E-평면 배열 안테나는 평균 AEP에서 값이 발생하지 않으며 θ_0 에 따라 주 빔 이득이 지역적으로 최소가 되거나 빔 주사 오차가 급격히 커지는 빔 주사각도가 발생하지 않음을 볼 수 있다. $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 기판 크기를 가지는 2

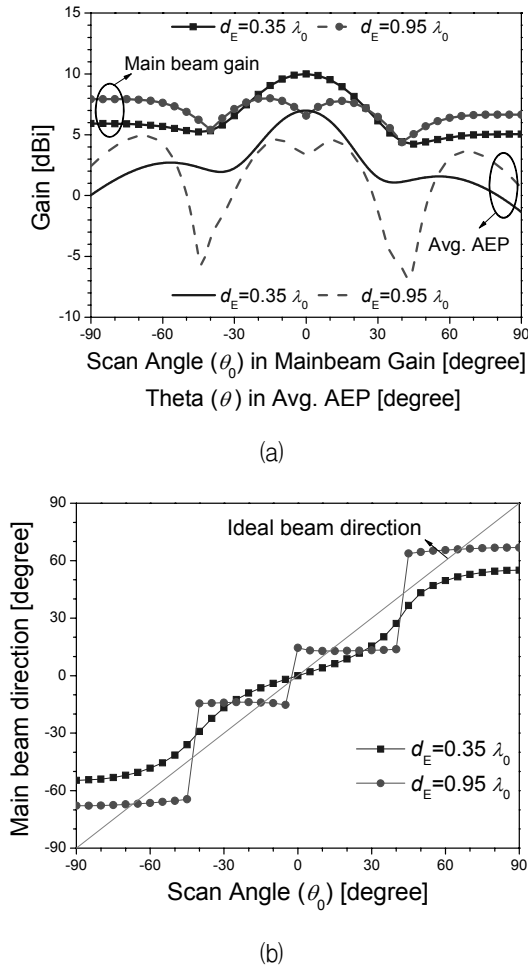


그림 15. 유전상수가 10.8 이고 $d = 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우 ($d_E = 0.35 \lambda_0$)와 나쁜 경우 ($d_E = 0.95 \lambda_0$)의 기판크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 빔 주사각도 θ_0 에 따른 주 빔 이득, 주 빔 방향과 θ 에 따른 평균 AEP

(a) 주 빔 이득과 평균 AEP, (b) 주 빔 방향 θ_m

Fig. 15. Main beam gain and direction versus scan angle θ_0 , and average AEP versus θ for the $0.7 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane array antennas printed on a CER-10 substrate with the substrate sizes that correspond to good ($d_E = 0.35 \lambda_0$) and bad ($d_E = 0.95 \lambda_0$) cases of radiation characteristics in average AEP.

(a) main beam gain and average AEP, (b) main beam direction θ_m .

소자 E-평면 배열 안테나는 평균 AEP에서 딥이 발생 하였지만 평균 AEP의 방사 특성이 나쁜 기판 크기를 가지는 경우에 비해 딥의 크기가 작아 주 빔 이득이 상대적으로 작게 감소되고 빔 주사 오차가 작게 증가함을

표 5. 유전상수가 10.8이고 $d = 0.5, 0.7 \lambda_0$ 인 경우 평균 AEP의 방사 특성이 좋은 경우와 나쁜 경우의 기판크기를 가지는 2 소자 E-평면 배열 안테나의 주요 방사 특성

Table 5. Radiation characteristics of the 0.5 and $0.7 \lambda_0$ spaced 2-element E-plane array antennas printed on a CER-10 substrate with the substrate sizes that correspond to good and bad cases of radiation characteristics in average AEP.

유전체 기판	CER-10			
	0.5		0.7	
d [λ_0]				
평균 AEP의 방사특성	좋은 경우	나쁜 경우	좋은 경우	나쁜 경우
d_E [λ_0]	0.35	1.00	0.35	0.95
최대 주 빔 이득 [dBi]	9.3	8.84	10.0	8.0
평균 AEP에서 딥의 위치(크기) [degree(dB)]	-	-42.1(11.0) -1.3(1.1) +41.7(11.9)	-35.8(2.9) +36.9(3.2)	-43.7(10.4) -0.2(1.1) +42.9(10.9)
주 빔 이득 지역 최소 각도(이득) [degree(dB)]	-	0.0(7.6)	-45.0(5.2) +45.0(4.2)	-40.0(5.4) 0.0(6.6) +40.0(4.4)
빔 주사 오차 지역 최대 각도(오차) [degree(degree)]	-	-50.0(55.1) +5.0(22.0) +55.0(55.5)	-40.0(6.9) +40.0(9.4)	-45.0(50.0) -5.0(29.7) +40.0(50.0)

볼 수 있다. 표 5에서 안테나 소자 간 간격에 관계없이 평균 AEP의 방사 특성이 나쁜 기판 크기를 가지는 경우에는 평균 AEP에서 딥이 발생하는 각도 근처에서 주 빔 이득이 크게 감소하며 빔 주사 오차가 매우 커짐을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 5 GHz 대역에서 동작하는 마이크로스트립 패치 안테나를 이용하여 유한한 기판 크기를 가지는 2 소자 E-평면 선형 배열 안테나를 설계하고 기판 크기에 따른 방사특성을 분석하였다. 서로 다른 유전상수를 가지는 기판을 이용하여 2 소자 E-평면 배열 안테나의 기판 크기에 따른 평균 능동소자패턴 특성을 분석하고 빔 주사각도에 따른 배열 안테나의 방사패턴 특성을 분석하였다. 패치 가장자리에서 기판 가장자리까지의 거리가 E-평면 방향으로 $2\Delta L$, H-평면 방향으로 ΔW 보다 클 때 두께가 3.2mm인 TLY-5와 CER-10 기판을 이용한 2 소자 E-평면 배열 안테나의 공진주파

수가 기판 크기에 따라 크게 변화하지 않았다. E-평면 방향 기판 크기 d_E 가 표면파의 위상 변화 $\beta_{sw}l = \pi$ 인 기판 크기보다 보다 작을 때 기판 가장자리 회절에 의해 방사특성이 크게 저하되지 않았다. 상호결합이 최대가 되는 기판 크기에서 평균 AEP와 평균 IEP를 비교한 결과 상호결합으로 인한 기생 방사효과보다 기판 가장자리에서의 회절에 의한 방사 효과가 2 소자 E-평면 배열 안테나의 방사패턴을 크게 저하시키는 주요 요인을 알 수 있었다. 평균 AEP에서 나타나는 덩의 크기가 클수록 빔 주사각에 따른 주 빔 방향 변화가 크게 나타났다.

2 소자 배열 안테나의 방사특성이 가장 우수하게 나타난 기판 크기 d_E 는 유전상수가 2.2와 10.8인 기판을 이용하고 인접 안테나간 거리가 $0.5\lambda_0$ 와 $0.7\lambda_0$ 인 경우 모두 d_E 가 약 $0.35\lambda_0$ 일 때로 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] D. M. Pozar and D. H. Schaubert, "Scan blindness in infinite phase arrays of printed dipoles," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 32, no. 6, pp. 602 - 610, 1984.
- [2] A. K. Bhattacharyya, "Analysis of circular patch antennas on electrically thick substrates," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 68, issues 1 - 3, pp. 485 - 495, Nov. 1991.
- [3] M. Coulombe, S. F. Koodiani, and C. Caloz, "Compact elongated mushroom (EM)-EBG structure for enhancement of patch antenna array performances," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 4, Apr. 2010.
- [4] F. Yang and Y. Rahmat-Samii, "Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap(EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no.10, pp. 2936-2946, Oct. 2003.
- [5] M. Salehi and A. Tavakoli, "A novel low mutual coupling microstrip antenna array design using defected ground structure," *Int. J. Electron. Commun.*, vol. 60, pp. 718-723, 2006.
- [6] D. N. Elsheakh, H. A. Elsadek, E. A. Abdallah, M. F. Iskander, and H. Elhenawy, "Low mutual coupling 2x2 microstrip patch array antenna by using novel shapes of defected ground structure," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 52, no. 5, May, 2010.
- [7] G. H. Huff and J. T. Bernhard, "Improvements in the performance of microstrip antennas on finite ground planes through ground plane edge serrations," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 12, no. 8, pp. 308-310, Aug. 2002.
- [8] D. M. Pozar, "A relation between the active input impedance and the active element pattern of a phased array," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 9, pp. 2486-2489, Sep. 2003.
- [9] D. F. Kelly and W. L. Stutzman, "Array antenna pattern modeling methods that include mutual coupling effects," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no.12, pp. 1625-1632, Dec. 1993.
- [10] R. L. Haupt, *Antenna arrays: a computational approach*, Wiley, pp. 339-400, 2010.
- [11] S. Chattopadhyay, M. Biswas, J. Y. Siddiqui, and D. Guha, "Rectangular microstrips with variable air gap and varying aspect ratio: improved formulations and experiments," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 51, no. 1, pp. 169-173, May, 2009.
- [12] 김태영, 박재우, 김부균, "유한한 정사각형 기판을 가지는 마이크로스트립 패치 안테나의 방사 특성," *전자공학회논문지*, 제 46권 TC편, 제 6호, 118-127, 2009년 6월
- [13] Y.-M. Yoon, H.-M. Koo, T.-Y. Kim, and B.-G. Kim, "Effect of edge reflections on the mutual coupling of a two-element linear microstrip patch antenna array positioned along the E-plane," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 783-786, 2012.
- [14] H. J. Visser, *Array and phased array antenna basics*, Wiley, pp. 201-219, 2005.

저 자 소 개



윤 영 민(학생회원)
 2003년 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
 2005년 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)
 2007년~현재 숭실대학교 전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : Microstrip Antennas, 위상 배열 안테나, EMI/EMC>



김 부 균(평생회원)
 1979년 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년 KAIST 전기및전자공학과 (공학석사)
 1989년 University of Southern California, 전자공학과 (공학박사)

1993년 IBM Almaden 연구소 방문 연구원
 1997년~1998년 Univ. of California at Santa Barbara 방문 부교수
 2004년~2006년 산자부 산업기술발전심의회 위원
 2008년~2010년 숭실대학교 IT대학 학장
 1981년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수

<주관심분야 : 위상 배열 안테나, SiP, 광통신 및 광네트워크용 소자>