

논문 2010-47TC-6-4

유한한 기판 크기가 E-평면상에 배열된 두 개의 패치안테나간의 상호결합에 미치는 영향

(Effect of a Finite Substrate on the Mutual Coupling of a Pair of
Microstrip Patch Antennas Positioned along the E-plane)

김태영*, 김군수*, 김부균**

(Tae-Young Kim, Gun-Su Kim, and Boo-Gyoun Kim)

요약

기판 크기가 유한하면 두 패치안테나간의 상호결합은 기판 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파에 의해 영향을 받는다. 상호결합이 최소가 되는 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리는 접지된 기판의 유효 유전상수에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 상호결합이 최소화되는 기판 크기는 이미지 방법을 사용하여 쉽게 계산할 수 있다. 이미지 방법으로 계산한 최적화된 기판 크기와 전산모의 결과로 얻어진 최적화된 기판 크기가 잘 일치하였다.

Abstract

The mutual coupling of a pair of microstrip patch antennas on a finite grounded dielectric substrate is influenced by the diffracted field of surface waves from the edges of a substrate. The effective dielectric constant of a grounded dielectric substrate determines the distance between the antenna center and the edge of a substrate to obtain the minimum mutual coupling between a pair of microstrip patch antennas. The optimum substrate size with the minimum mutual coupling is easily calculated using the image method. The optimum substrate sizes using the image method are in good agreement with the results obtained by the full wave simulation.

Keywords : Microstrip patch antennas, Phased array antenna, Mutual coupling, Image method, Finite grounded substrate.

I. 서론

위상 배열 안테나의 단위 안테나로 많이 사용되는 패치안테나는 가격이 저렴하고, 제작이 쉬우며, Low-profile이기 때문에 집적화가 가능하다는 장점을 가지나,

대역폭이 좁고 효율이 낮다는 단점이 있다^[1]. 대역폭을 증가시키는 간단한 방법은 기판의 두께를 증가시키는 것이지만 기판의 두께가 증가하게 되면 표면파의 발생으로 인하여 위상 배열 안테나의 단위 안테나 간의 상호결합(mutual coupling)이 증가하고 방사 효율이 저하되는 단점이 있다^[2]. 또한 위상 배열 안테나의 기판 크기가 유한하면 기판의 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파에 의해 상호결합이 변화되어 위상 배열 안테나의 특성이 변화된다^[3]. 이러한 표면파의 영향을 줄이기 위하여 EBG (Electromagnetic Bandgap) 구조를 패치안테나 사이에 집적하거나^[4], 패치안테나의 패치 밑이나 주변의 유전체 기판을 제거하여 기판의 유효 유전율을

* 학생회원, ** 평생회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부

(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음 [KI001673, 지능형안테나 기술개발]

접수일자: 2010년4월2일, 수정완료일: 2010년6월10일

낮추는 등의 방법이 연구되었다^[5-7]. 도파관을 따라 배열된 슬롯 배열 안테나에서 배열 방향과 수직인 가장자리에서 회절되는 필드가 안테나간의 상호결합에 미치는 영향을 이미지 방법(image method)을 사용하여 연구한 결과가 보고되었다^[8-9].

우리는 유한한 기판의 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파가 E-평면상에 배열된 두 개의 패치안테나간의 상호결합에 미치는 영향을 전산모의 결과를 통하여 연구하였다. 논문 [4]에서 패치안테나간의 거리가 $0.75 \lambda_0$ (5.8GHz) 일 때 EBG 구조를 집적하여 공진 주파수에서 상호결합을 -16.8 dB에서 -24.6 dB로 약 8 dB 억제시켰다. 우리는 기판의 유전상수가 10이고 두께가 3.2 mm 인 경우 패치안테나간의 거리가 $0.75 \lambda_0$ (5GHz) 일 때 상호결합이 크게 발생하는 기판 크기에서의 상호결합은 -13.2 dB 이지만 단지 기판의 크기만을 변화시켜 상호결합이 약 12 dB 억제된 -25.6 dB가 발생하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 전산모의를 통하여 얻은 상호결합이 최소화 되는 기판 크기 결과와 이미지 방법을 적용하여 매우 쉽게 계산되는 기판 크기 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있었다. 따라서 배열 안테나의 단위 안테나간의 상호결합을 최소화시키는 최적의 기판 크기를 쉽게 구할 수 있어 위상 배열 안테나의 특성을 향상시킬 수 있으리라 생각된다.

유한한 기판 크기에 따른 패치안테나간의 상호결합 특성을 Ansoft사의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 사용하여 전산모의 하였고 이미지 방법을 사용하여 해석한 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 제 II장에서 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합 특성에 대하여 알아보았다. 제 III장에서 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리가 상호결합에 미치는 영향에 대하여 알아보았고 제 IV장에서 최적화된 기판 크기에서 패치안테나간의 거리에 따른 상호결합 특성에 대하여 살펴보았다. 끝으로 제 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합

패치안테나간의 상호결합은 기판을 따라 진행되는 표면파에 의한 결합과 패치에서 방사되는 필드에 의한 상호결합으로 생각할 수 있다. 표면파에 의한 패치안테나간의 상호결합은 패치안테나간의 거리가 2배 증가할

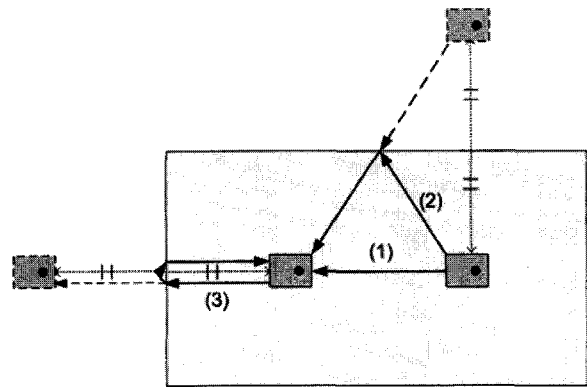


그림 1. E-평면상에 배열된 두 개의 패치안테나의 구조도

Fig. 1. Schematic diagram of a pair of patch antennas positioned along the E-plane.

때 약 3 dB 감소하고 패치안테나에서 방사되는 필드에 의한 상호결합은 패치안테나간의 거리가 2배 증가할 때 E-평면상으로 배열된 경우는 주로 far field에 의한 상호결합이 발생하여 약 6 dB 감소하고 H-평면상으로 배열된 경우는 주로 near field에 의한 상호결합이 발생하여 약 12 dB 감소한다^[10]. 표면파가 패치안테나 특성에 영향을 주기 시작하는 기판의 두께, h, 는 다음 수식으로 구할 수 있다^[10].

$$h = \frac{0.3\lambda_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

그림 1은 E-평면상으로 배열된 두 개의 패치안테나의 구조도를 나타낸다. E-평면상으로 배열된 두 개의 패치안테나간의 상호결합에 영향을 주는 표면파의 주요 성분은 다음 3가지로 생각할 수 있다. (1) 패치안테나간의 직접적인 표면파의 결합, (2) 배열 방향에 수직인 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파의 결합, (3) 배열 방향으로 진행하여 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파의 결합이다. 표면파는 패치안테나의 E-평면 방향으로 주로 진행하기 때문에 그림 1의 경우 (1)성분의 표면파가 상호결합 특성에 크게 영향을 줄 것으로 예상된다.

여러 가지 기판 두께에서 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합 특성을 살펴보기 위하여 5 GHz 로 동작하는 패치안테나의 배열 방향을 E-평면상에 놓고 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합 특성을 살펴보았다. 전산모의에 사용된 기판은 Taconic사의 CER-10 으로 유전상수가 10 이고 loss tangent 는 0.0035 이다. 패치안테나 중심 간의 거리를 $0.5 \lambda_0$ 부

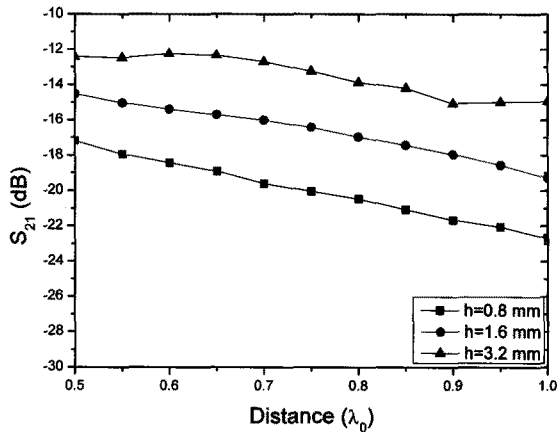


그림 2. 기판의 유전상수가 10이고 두께가 0.8 mm, 1.6 mm, 3.2 mm 인 경우 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합

Fig. 2. Mutual coupling between a pair of patch antennas versus the distance between the antenna centers with $\epsilon_r=10$ and the substrate thickness of 0.8 mm, 1.6 mm, and 3.2 mm.

터 $1.0 \lambda_0$ 까지 $0.05 \lambda_0$ 간격으로 증가시켜가며 특성을 전산모의 하였다. 이 때 패치안테나 중심에서 E-평면(길이 방향)과 만나는 기판 가장자리와 H-평면(폭 방향)과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 모두 $0.5 \lambda_0$ 로 고정하였다.

그림 2는 기판의 유전상수가 10이고 두께가 0.8 mm, 1.6 mm, 3.2 mm 인 경우 두 개의 일반적인 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합을 나타낸다. 기판 두께가 0.8 mm 인 경우 패치안테나의 크기는 $8.9 \text{ mm} \times 8.4 \text{ mm}$ 이고 유효 유전상수는 1.01 이다. 기판의 두께가 0.9 mm 이하이기 때문에 표면파가 패치안테나간의 상호결합에 미치는 영향이 작다. 패치안테나 중심 간의 거리가 $0.5 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 로 두 배 증가할 때 상호결합이 5.5 dB 감소하였다. 표면파에 의한 상호결합이 거의 발생하지 않기 때문에 주로 far field에 의한 상호결합이 발생함을 볼 수 있다.

기판 두께가 1.6 mm 인 경우 패치안테나의 크기는 $8.5 \text{ mm} \times 8.1 \text{ mm}$ 이고 유효 유전상수는 1.03이다. 기판의 두께가 0.9 mm 이상이기 때문에 표면파가 패치안테나간의 상호결합에 영향을 미침을 볼 수 있다. 패치안테나 중심 간의 거리가 $0.5 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 로 두 배 증가할 때 상호결합이 4.77 dB 감소하였다. 표면파에 의한 상호결합이 기판 두께가 0.8 mm 인 경우보다 크게 발생하고 거리가 2배 증가할 때 감소되는 상호결합

의 크기는 작음을 볼 수 있었다.

기판 두께가 3.2 mm 인 경우 표면파가 패치안테나간의 상호결합에 미치는 영향이 기판 두께가 1.6 mm 인 경우보다 더 크다. 5 GHz에서 동작하는 패치안테나의 패치 크기는 $7.6 \text{ mm} \times 6.1 \text{ mm}$ 이며 접지된 유전체의 유효 유전상수는 1.21이다. 패치안테나 중심 간의 거리가 $0.5 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 로 두 배 증가할 때 상호결합이 2.79 dB 감소하였다. 따라서 두 패치안테나간의 상호결합은 표면파에 의하여 주로 발생됨을 알 수 있다.

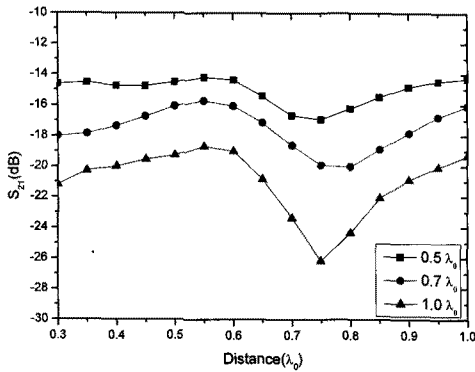
기판 두께가 두꺼울수록 표면파가 상호결합에 미치는 영향이 크기 때문에 패치안테나간의 상호결합이 크게 발생됨을 볼 수 있었다. 배열 방향이 E-평면상에 있는 경우 유한한 기판의 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파가 패치안테나간의 상호결합에 미치는 영향을 알아보기 위하여 유전상수가 10인 기판의 경우에 기판 두께가 1.6 mm 와 3.2 mm 인 기판에서 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리를 변화시키며 상호결합 특성을 살펴보았다. 또한 기판의 유효 유전상수가 기판의 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파가 패치안테나간의 상호결합에 미치는 영향을 알아보기 위하여 유전상수가 4.6인 기판에서 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리를 변화시키며 상호결합 특성을 살펴보았다.

III. 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리가 상호결합에 미치는 영향

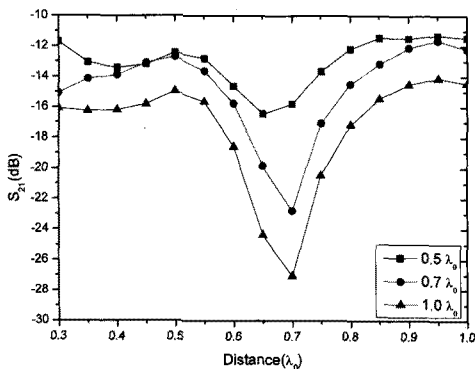
3.1 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 두 개의 패치안테나간의 상호결합

패치안테나 중심 간의 거리를 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 로 고정하고 패치안테나 중심으로부터 E-평면(길이 방향)과 만나는 기판 가장자리까지의 거리를 $0.3 \lambda_0$ 부터 $1.0 \lambda_0$ 까지 $0.05 \lambda_0$ 간격으로 증가시키면서 상호결합 특성을 전산모의 하였다. 기판 두께가 1.6 mm 와 3.2 mm 일 때 각각 패치안테나 중심으로부터 H-평면(폭 방향)과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 $0.5 \lambda_0$ 로 고정하였다.

그림 3(a)와 (b)는 각각 기판의 유전상수가 10이고 두께가 1.6 mm 와 3.2 mm 일 때 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 에서 패치



(a)



(b)

그림 3. 기판의 유전상수가 10이고 두께가 (a) 1.6 mm 와 (b) 3.2 mm 일 때 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 에서 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 상호결합

Fig. 3. Mutual coupling between a pair of patch antennas versus the distance between the antenna center and the substrate edge on the E-plane when the distances between the antenna centers are $0.5 \lambda_0$, $0.6 \lambda_0$ and $0.7 \lambda_0$ with $\epsilon_r=10$ and the substrate thickness of (a) 1.6 mm and (b) 3.2 mm.

안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 상호결합 특성을 나타낸다. 그림 3(a)는 기판 두께가 1.6 mm 인 경우로 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.3 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 까지 변화할 때 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 일 때 상호결합의 크기는 2.3 dB, 3.9 dB, 5.1 dB 변화하였다. 패치안테나 중심 간의 거리에 상관없이 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가

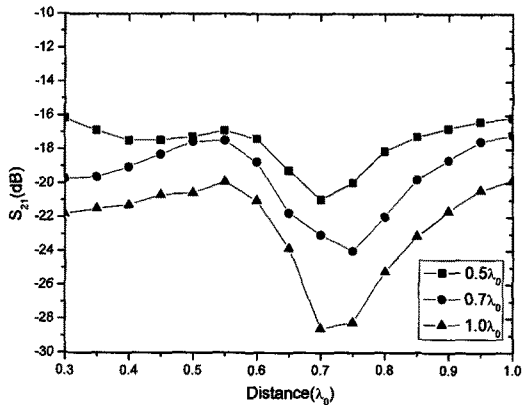
$0.75 \lambda_0$ 와 $0.8 \lambda_0$ 사이에서 상호결합이 가장 작게 발생함을 볼 수 있다.

이러한 현상은 이미지 방법을 사용하여 다음과 같이 해석할 수 있다. 그림 1에서 표면파 (3)성분이 기판 가장자리에서 반사되어 one-round trip 하여 위상변화가 $(2N+1)\pi$ 만큼 발생되도록 기판 가장자리까지의 거리를 계산하면 $0.74 \lambda_0(0.75 \lambda_g)$ 이고 전산모의 결과에서 상호결합이 최소가 되는 거리와 일치한다. λ_g 는 기판에서의 파장을 나타낸다.

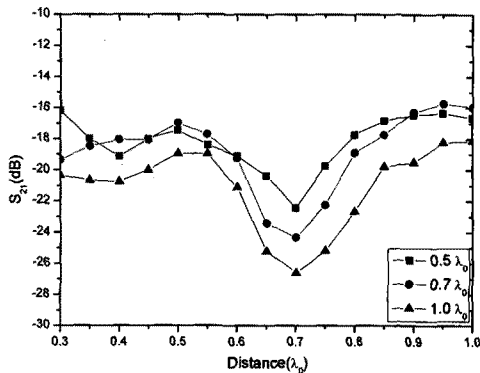
그림 3(b)는 기판 두께가 3.2 mm 인 경우로 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.3 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 까지 변화할 때 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 에서 상호결합의 크기는 5.16 dB, 11.16 dB, 12.94 dB 변화하였다. 패치안테나 중심 간의 거리에 상관없이 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.7 \lambda_0$ 근처에서 상호결합이 가장 작게 발생함을 볼 수 있다. 기판 두께가 3.2 mm 인 경우 기판의 유효 유전상수가 1.21이기 때문에 표면파 (3)성분이 기판 가장자리에서 반사되어 one-round trip 하여 위상변화가 $(2N+1)\pi$ 만큼 되기 위한 기판 가장자리까지의 거리는 $0.68 \lambda_0(0.75 \lambda_g)$ 로 전산모의 결과와 일치함을 알 수 있다. 기판 두께가 1.6 mm 인 경우가 기판 두께가 3.2 mm 인 경우와 비교하여 기판의 두께가 얇기 때문에 표면파의 발생이 작아 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리가 상호결합에 미치는 영향이 작은 것을 볼 수 있다.

접지된 유전체의 유효 유전상수가 상호결합에 미치는 영향을 알아보기 위하여 전산모의에 사용된 기판은 FR-4 로 유전상수가 4.6 이고 loss tangent 는 0.02 이며 기판 두께는 3.2 mm 이다. 패치안테나 중심 간의 거리를 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 로 고정하고 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리를 $0.3 \lambda_0$ 부터 $1.0 \lambda_0$ 까지 $0.1 \lambda_0$ 간격으로 증가시키면서 상호결합 특성을 전산모의 하였다. 이 때 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판의 가장자리까지의 거리는 $0.5 \lambda_0$ 로 고정하였다.

그림 4(a)와 (b)는 각각 기판의 유전상수가 4.6이고 두께가 3.2 mm 이고 동작주파수가 5 GHz 와 7 GHz 인 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 에서 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 상호결합 특



(a)



(b)

그림 4. 기판의 유전상수가 4.6이고 두께가 3.2 mm 이고 동작 주파수가 (a) 5 GHz 와 (b) 7 GHz 인 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5\lambda_0$, $0.7\lambda_0$, $1.0\lambda_0$ 에서 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 상호결합

Fig. 4. Mutual coupling between a pair of patch antennas versus the distance between the antenna center and the substrate edge on the E-plane when the distance between the antenna centers are $0.5\lambda_0$, $0.6\lambda_0$ and $0.7\lambda_0$ for $\epsilon_r=4.6$ and the operating frequency at (a) 5 GHz and (b) 7 GHz.

성을 나타낸다.

그림 4(a)는 동작주파수가 5 GHz 인 경우로 λ_0 는 약 60mm 이다. 접지된 유전체의 유효 유전상수는 1.09 이며 패치안테나의 크기는 12.2 mm × 11 mm 이다. 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.3\lambda_0$ 에서 $1.0\lambda_0$ 까지 변화할 때 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5\lambda_0$, $0.7\lambda_0$, $1.0\lambda_0$

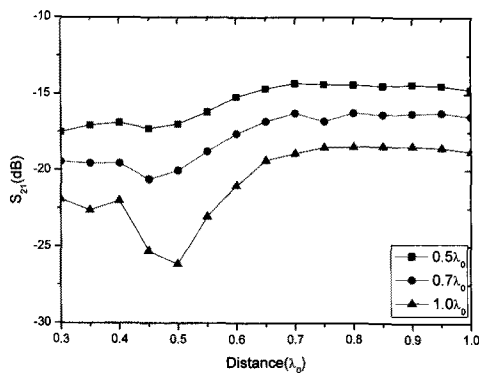
일 때 상호결합의 크기는 4.81 dB, 5.88 dB, 8.76 dB 변화하였다. 패치안테나 중심 간의 거리에 상관없이 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.7\lambda_0$ 근처에서 상호결합이 가장 작게 발생함을 볼 수 있다. 이미지 방법을 사용하여 계산한 표면파 (3)성분이 기판 가장자리에서 반사되어 one-round trip 하여 위상변화가 $(2N+1)\pi$ 만큼 되기 위한 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 $0.72\lambda_0(0.75\lambda_g)$ 로 전산모의 결과와 일치함을 알 수 있다. 그림 3(a)의 경우보다 유효 유전상수가 0.06 크기 때문에 기판 가장자리까지의 거리가 $0.7\lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 작게 발생함을 볼 수 있다.

그림 4(b)는 동작주파수가 7 GHz 인 경우로 λ_0 는 약 43 mm 이다. 접지된 유전체의 유효 유전상수는 1.22 이며 패치안테나의 크기는 8.3 mm × 6.7 mm 이다. 패치안테나 중심으로부터 기판 가장자리까지의 거리가 $0.3\lambda_0$ 에서 $1.0\lambda_0$ 까지 변화할 때 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5\lambda_0$, $0.7\lambda_0$, $1.0\lambda_0$ 에서 상호결합의 크기는 6.26 dB, 8.59 dB, 8.47 dB 변화하였다. 패치안테나 중심 간의 거리에 상관없이 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.7\lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 작게 발생함을 볼 수 있다. 이미지 방법을 사용하여 계산한 표면파 (3)성분이 기판 가장자리에서 반사되어 one-round trip 하여 위상변화가 $(2N+1)\pi$ 만큼 되기 위한 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 $0.68\lambda_0(0.75\lambda_g)$ 로 전산모의 결과와 일치함을 알 수 있다. 그림 3(b)의 경우와 유효 유전상수가 비슷하여 가장자리까지의 거리에 따른 상호결합 특성이 비슷하였다. 같은 두께를 가지는 경우 동작주파수가 높을수록 표면파의 발생이 커지기 때문에 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 상호결합에 미치는 영향이 큰 것을 볼 수 있다.

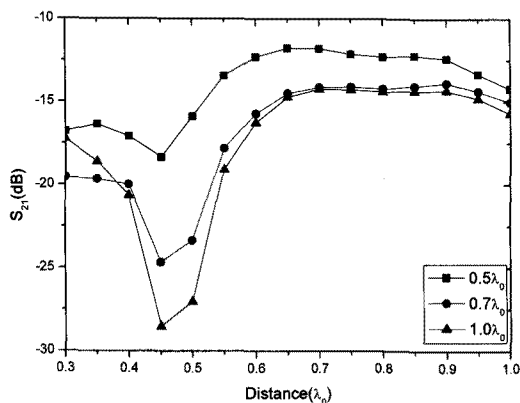
접지된 유전체의 유효 유전상수가 상호결합에 미치는 영향을 더 자세히 알아보기 위하여 동작 주파수가 5 GHz 일 때 유효 유전상수가 1.22 인 기판을 사용하여 상호결합 특성을 전산모의 하였다. 전산모의에 사용된 기판은 FR-4 로 유전상수가 4.6 이며 기판 두께는 4.5 mm 이다. 기판의 유전상수와 두께가 같지 않아도 접지된 기판의 유효 유전상수가 비슷한 경우 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리가 상호결합 특성에 미치는 영향이 비슷함을 확인 할 수 있었다.

3.2 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 두 개의 패치안테나간의 상호결합

전산모의에 사용된 기판은 유전상수가 10 이고 기판 두께가 1.6 mm와 3.2 mm 이다. 패치안테나 중심 간의 거리를 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 로 고정하고 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리를 $0.3 \lambda_0$ 부터 $1.0 \lambda_0$ 까지 $0.1 \lambda_0$ 간격으로



(a)



(b)

그림 5. 기판의 유전상수가 10이고 두께가 (a) 1.6 mm 와 (b) 3.2 mm 일 때 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 에서 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 상호결합

Fig. 5. Mutual coupling between a pair of patch antennas versus the distance between the antenna center and the substrate edge on the H-plane when the distance between the antenna centers are $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$ and $1.0 \lambda_0$ for $\epsilon_r=10$ and the substrate thickness of (a) 1.6 mm and (b) 3.2 mm.

증가시키면서 상호결합 특성을 전산모의 하였다. 기판 두께가 1.6 mm와 3.2 mm 일 때 각각 패치안테나의 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 그림 3(a)와 (b)에서 상호결합이 가장 작게 발생하는 $0.75 \lambda_0$ 와 $0.7 \lambda_0$ 로 고정하였다.

그림 5 (a)와 (b)는 기판의 유전상수가 10이고 각각 두께가 1.6 mm 와 3.2 mm 일 때 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 에서 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리에 따른 상호결합을 나타낸다.

그림 5(a)는 기판 두께가 1.6 mm 인 경우로 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.3 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 까지 변화할 때 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 일 때 상호결합의 크기는 2.7 dB, 3.8 dB, 7.7 dB 변화하였다. 패치안테나간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 일 때 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 각각 $0.45 \lambda_0$, $0.45 \lambda_0$, $0.5 \lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 작게 발생함을 볼 수 있다.

이러한 현상은 이미지 방법을 사용하여 다음과 같이 해석할 수 있다. 그림 1에서 표면파 (1)성분과 (2)성분으로 상쇄시키면 상호결합을 줄일 수 있다. 따라서 상호결합이 최소가 되기 위해서는 표면파 (1)성분과 H-평면과 만나는 기판 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파 (2)성분의 위상차이가 π 만큼 발생되도록 하면 된다. 회절되어 들어오는 표면파 (2)성분과 표면파 (1)성분의 위상차이가 π 만큼 발생되기 위한 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 이미지 방법을 사용하면 다음 수식으로 주어진다.

$$W_\pi = \frac{1}{2} \sqrt{d+0.25} \tag{2}$$

여기서 d는 안테나 중심 간의 거리이고 $w\pi$ 는 표면파 (2)성분과 표면파 (1)성분의 위상차이가 π 만큼 발생되기 위한 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리로 단위는 λ_g 이다. 식 (2)를 이용하여 계산한 회절되어 들어오는 표면파 (2)성분과 표면파 (1)성분의 위상차이가 π 만큼 발생하는 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 패치안테나 중심 간의 거리가 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 일 때 각각 $0.43 \lambda_0(0.44 \lambda_g)$, $0.48 \lambda_0(0.49 \lambda_g)$,

$0.55 \lambda_0 (0.56 \lambda_g)$ 이다. 이 결과는 전산모의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 5(b)는 기판 두께가 3.2 mm인 경우로 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.3 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 까지 변화할 때 패치안테나 중심 간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 에서 상호결합의 크기는 6.57 dB, 10.6 dB, 14.29 dB 변화하였다. 패치안테나간의 거리가 각각 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 일 때 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 각각 $0.45 \lambda_0$, $0.45 \lambda_0$, $0.45 \lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 작게 발생함을 볼 수 있다. 식 (2)를 이용하여 계산한 회절되어 들어오는 표면파 (2)성분과 표면파 (1)성분의 위상차이가 π 만큼 발생하는 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 패치안테나 중심 간의 거리가 $0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$, $1.0 \lambda_0$ 일 때 각각 $0.41 \lambda_0 (0.45 \lambda_g)$, $0.46 \lambda_0 (0.50 \lambda_g)$, $0.53 \lambda_0 (0.58 \lambda_g)$ 이다. 이 결과는 전산모의 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

접지된 유전체의 유효 유전상수가 상호결합에 미치는 영향을 알아보기 위하여 동작 주파수가 5 GHz 일 때 유효 유전상수가 1.22 인 기판을 사용하여 전산모의 하였다. 전산모의에 사용된 기판은 FR-4 로 유전상수가 4.6 이며 기판 두께는 4.5 mm 이다. 기판의 유전상수와 두께가 같지 않아도 접지된 기판의 유효 유전상수가 비슷한 경우 패치안테나 중심과 기판 가장자리까지의 거리가 상호결합 특성에 미치는 영향이 비슷함을 확인할 수 있었다.

IV. 최적화된 기판 크기에서 패치안테나간의 거리에 따른 상호결합

기판의 유전상수가 10이고 두께가 1.6 mm 와 3.2 mm 일 때 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 상호결합이 평균적으로 작게 발생하는 $0.5 \lambda_0$ 로 고정하였다. 기판 두께가 1.6 mm (3.2 mm)인 경우 상호결합이 가장 크게 발생하는 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리인 $0.5 \lambda_0$ ($0.5 \lambda_0$)와 상호결합이 가장 작게 발생하는 거리인 $0.75 \lambda_0$ ($0.7 \lambda_0$)인 두 가지 경우에 대하여 패치안테나 중심 간의 거리를 $0.5 \lambda_0$ 부터 $1.0 \lambda_0$ 까지 $0.05 \lambda_0$ 간격으로 증가시키면서 상호결합 특성을 비교하였다. 그 결과를 그림 6에 보인다.

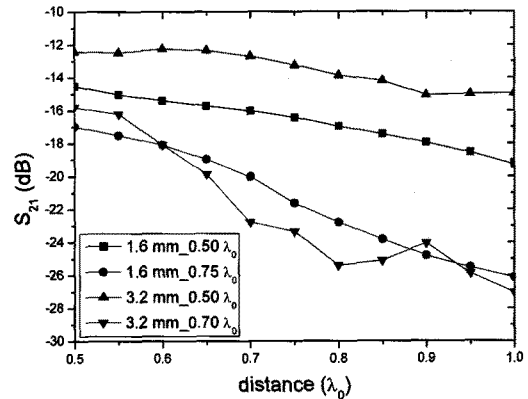


그림 6. 기판의 유전상수가 10이고 기판 두께가 1.6 mm(3.2 mm)이고 패치안테나 중심으로부터 H-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 $0.5 \lambda_0$ 이며, 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.5 \lambda_0$, $0.75 \lambda_0$ ($0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$)인 경우 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합

Fig. 6. Mutual coupling between a pair of patch antennas versus the distance between the antenna centers for $\epsilon_r=10$, the distance between the antenna center and the substrate edge on the H-plane is $0.5 \lambda_0$ and the substrate thickness of 1.6 mm (3.2 mm) when the distances between the antenna center and the substrate edge on the E-plane are $0.5 \lambda_0$ and $0.75 \lambda_0$ ($0.5 \lambda_0$ and $0.7 \lambda_0$).

그림 6은 기판의 유전상수가 10이고 기판 두께가 1.6 mm (3.2 mm)이고 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.5 \lambda_0$, $0.75 \lambda_0$ ($0.5 \lambda_0$, $0.7 \lambda_0$)인 경우 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합을 나타낸다.

그림 6에서 기판 두께가 1.6 mm 인 경우 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.5 \lambda_0$ 인 경우 패치안테나 중심 간의 거리가 $0.5 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 로 두 배 증가할 때 상호결합이 4.77 dB 감소하였다. 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파 (3) 성분과 표면파 (1)성분이 위상차이가 거의 같은 경우이지만 표면파의 생성이 작아 표면파가 상호결합에 미치는 영향이 작음을 볼 수 있다. 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.75 \lambda_0$ 인 경우 패치안테나 중심 간의 거리가 두 배 증가할 때 상호결합이 9.2 dB 감소하였다. E-평면과 만나는 기판 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파 (3)성분과

표면파 (1)성분의 위상차이가 거의 π 이기 때문에 표면파에 의한 결합이 서로 상쇄되어 주로 near field 에 의한 상호결합이 발생하여 상호결합이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 패치안테나간의 거리가 $0.75 \lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 크게 발생하는 기판 크기에서는 상호결합이 -16.43 dB 발생하였지만 최적화된 기판 크기를 적용하면 상호결합이 -22.82 dB 로 약 6.4 dB 억제된 것을 볼 수 있다.

기판 두께가 3.2 mm 인 경우 패치안테나 중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.5 \lambda_0$ 인 경우 패치안테나 중심 간의 거리가 $0.5 \lambda_0$ 에서 $1.0 \lambda_0$ 로 두 배 증가할 때 상호결합이 2.79 dB 감소하였다. E-평면과 만나는 기판 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파 (3)성분과 표면파 (1)성분의 위상차이가 거의 같은 경우로 상호결합이 주로 표면파에 의해 발생함을 볼 수 있다. 패치중심으로부터 E-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리가 $0.7 \lambda_0$ 인 경우 패치안테나 중심 간의 거리가 두 배 증가할 때 상호결합이 11.3 dB 감소하였다. E-평면과 만나는 기판 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파 (3)성분과 표면파 (1)성분이 위상차이가 거의 π 가 되는 경우로 표면파에 의한 결합이 서로 상쇄되어 주로 near field에 의한 상호결합이 발생하여 상호결합이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 패치안테나간의 거리가 $0.75 \lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 크게 발생하는 기판 크기에서는 상호결합이 -13.2 dB 발생하였지만 최적화된 기판 크기를 적용하면 상호결합이 약 12 dB 억제된 -25.6 dB가 발생하는 결과를 얻을 수 있었다. 기판의 크기를 최적화하면 두 개의 패치안테나 중심 간의 거리에 따른 상호결합 특성을 개선시켜 위상 배열 안테나의 특성을 향상시킬 수 있을 것이라 생각된다.

IV. 결 론

유한한 기판 크기가 E-평면상에 배열된 두 패치안테나의 상호결합 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 가장자리에서 회절되어 들어오는 표면파에 의해 두 패치안테나간의 상호결합 특성이 영향을 받음을 확인하였다. 표면파의 여러 가지 이동경로에 따른 위상차에 의한 간섭 효과를 이용하여 표면파를 서로 상쇄시키면 상호결합을 작게 할 수 있다. 두 패치안테나간의 거리가 주어졌을 때 상호결합이 최소가 되는 패치안테나 중심으로부터 E-평면(길이 방향)과 만나는 기판 가장자리

까지의 거리와 H-평면(폭 방향)과 만나는 기판 가장자리까지의 거리는 접지된 기판의 유효 유전상수에 의해 결정됨을 알 수 있었다.

유전상수가 10이고 기판 두께가 1.6 mm 인 경우 패치안테나간의 거리가 $0.75 \lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 크게 발생하는 기판 크기에서는 상호결합이 -16.43 dB 발생하였지만 최적화된 기판 크기에서는 상호결합이 약 6.4 dB 억제된 -22.82 dB가 발생되었다. 또한 기판 두께가 3.2 mm 인 경우 패치안테나간의 거리가 $0.75 \lambda_0$ 에서 상호결합이 가장 크게 발생하는 기판 크기에서는 상호결합이 -13.2 dB 발생하였지만 최적화된 기판 크기에서는 상호결합이 약 12 dB 억제된 -25.6 dB가 발생하는 결과를 얻을 수 있었다.

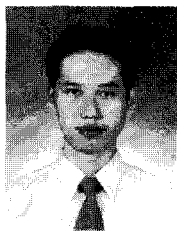
두 패치안테나간의 거리가 주어진 경우 영상 방법을 사용하여 상호결합을 최소화할 수 있는 패치안테나 중심으로부터 E(H)-평면과 만나는 기판 가장자리까지의 거리를 간단히 구할 수 있고 전산모의 결과와 잘 일치함을 확인하였다. 또한 이 결과는 기판의 특정 유전상수나 두께와 관계없이 접지된 기판의 유효 유전상수에 의해 결정됨을 알 수 있었다. 따라서 본 논문의 결과를 사용하면 두 패치안테나간의 상호결합이 최소화되는 기판 크기를 구할 수 있어 위상 배열 안테나의 단위 안테나간의 상호결합을 억제시켜 위상배열 안테나의 특성을 향상시킬 수 있으리라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Garg, P. Bhartia, I. Bahl, and A. Ittipiboon, "Microstrip Antenna Design Handbook," 2nd edition, Boston·London, Artech House, 2000.
- [2] M. A. Khayat, J. T. Williams, D. R. Jackson, and S. A. Long, "Mutual Coupling Between Reduced Surface-Wave Microstrip Antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 48, no. 10, pp. 1581-1593, Oct. 2000.
- [3] D. M. Pozar, "The Active Element Pattern," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 42, no. 8, pp. 1176-1178, Aug. 1994.
- [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 Propagat., vol. 51, no. 10, pp. 2936-2946. Oct. 2003.
- [5] G. P. Gauthier, A. Courty, and G. H. Rebeiz,

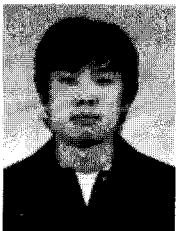
- "Microstrip antennas on synthesized low dielectric-constant substrate," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 45, pp. 1310-1314, Aug. 1997.
- [6] I. Papapolymerou, R. F. Frayton, and L. P. B. Katehi, "Micromachined patch antennas," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 46, pp. 275-283, Feb. 1998.
- [7] J. S. Colburn and Y. Rahmat-Samii, "Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 47, pp. 1785-1794, Dec. 1999.
- [8] L. Josefsson, "Mutual coupling calculations including edge effect," Electronics letters, vol. 30, no. 25, pp. 2087-2088, Dec. 1994.
- [9] Giuseppe Mazzarella and Gaetano Panariello, "Evaluation of Edge Effects in Slot Arrays Using the Geometrical Theory of Diffraction," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 37, no. 3, pp. 392-395, Mar. 1989.
- [10] Marija M. Nikolić, Antonije R. Djordjević, and Arye Nehorai, "Microstrip Antennas With Suppressed Radiation in Horizontal Directions and Reduced Coupling," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 53, no. 11, pp. 3469-3476, Nov. 2005.

 저 자 소 개



김 태 영(정회원)
 2003년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사 졸업.
 2005년 숭실대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2005년~현재 숭실대학교 전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : Microstrip Antennas, EBG, THz signal generation>



김 군 수(정회원)
 2009년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사 졸업.
 2009년~현재 숭실대학교 전자공학과 석사 과정.

<주관심분야 : 위상 배열 안테나, EBG, DGS>



김 부 균(평생회원)-교신저자
 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
 2010년~현재 대한전자공학회 상임이사(정보화)
 <주관심분야 : 위상 배열 안테나, SiP, 광통신 및 광네트워크용 소자>