

대칭 SSAIP 구조의 슬롯 결합 Back-to-Back 마이크로스트립 위상배열 안테나의 설계

정회원 김 태 현*, 전 계 석**

Design of Slot-Coupled Back-to-Back Microstrip Phased Array Antenna with Symmetrical SSAIP Configuration

Tae-Hyoun Kim*, Kye-Suk Jun** *Regular Members*

요 약

본 연구에서는 수평면에 대해서 양방향성을 갖고 접지면을 향해서 주빔이 25°의 기울기로 지향하도록 설계된 대칭 SSAIP(Strip, Slot, Air, Inverted Patch) 구조의 슬롯 결합 back-to-back 마이크로스트립 위상배열 안테나를 설계, 제작하였다. 이 구조의 안테나는 2-섹터 셀 사이트에서 기지국 또는 중계기의 지향성 안테나에 적용할 수 있으며, 도로 환경에 따라 지향각 25°를 기준으로 약 ±10° 정도 빔을 틸트할 수 있도록 위상기와 결합된다. 안테나는 공동모델을 이용하여 해석하고 앙상블로 설계한다. IMT-2000의 상·하향 링크 주파수 범위인 1.885~2.2GHz에서 안테나를 측정된 결과 임피던스 대역폭은 약 21%이었으며, ±0.37°의 지향각 오차를 보였다.

ABSTRACT

A slot-coupled back-to-back microstrip phased array antenna has been proposed. This antenna takes the configuration of a symmetrical SSAIP(Strip, Slot, Air, Inverted Patch). It has a bidirectional radiation pattern in horizontal plane and 25° main beam squint toward ground plane. The configuration of the antenna can be applied to the directional antenna of the base station or repeater for the two-sector cell site. The phase of each array element is controlled by the phase shifter, which is able to tilt a beam approximately from 15° to 35° according to circumstances of the street. The antenna analysis is based on the cavity model and the design is achieved using Ensemble. The measurement is performed in frequency range from 1.885GHz to 2.2GHz covering up-link and down-link of IMT-2000. Experimental results have shown that the impedance bandwidth is approximately 21% and the average error of pointing angles is ±0.37°.

I. 서 론

현재 도로를 따라 설치된 이동통신 기지국 중 2-섹터 셀 사이트(2-sector cell site) 환경에서 사용되는 지향성 안테나는 수평 평면에 대해서는 양방향성 방사패턴을 갖고, 수직 방향에 대해서는 도로를 향해 빔을 집중할 수 있는 안테나가 요구된다^[1]. 이러한 시스템을 위해 Becker^[1]와 Iwasaki^[2] 등이 몇

가지 형태의 안테나를 제안, 개발하였다. 그러나 Becker의 안테나 구조는 도로를 향해 빔을 집중할 수 있으나 단방향성이며 Iwasaki의 안테나 구조는 양방향성을 실현하였으나 안테나 구조가 대칭이 아니며 양쪽 방사패턴이 동일하지 않은 단점이 있다. 그리고 Becker와 Iwasaki가 제안한 구조 모두 도로를 향하는 주빔의 틸트각을 조정하는 방법을 고려하지 않고 있다.

* 세립정보기술(주),

** 경희대학교 전자정보학부(gsjun@nms.kyunghee.ac.kr)

논문번호 : K01128-0509, 접수일자 : 2001년 5월 9일

* 본 연구는 2000년도 정보통신부 우수시범학교 지원사업의 경희대학교 대응연구비 지원과제로 수행되었습니다.

본 연구에서는 수평면에서 양방향성을 갖고 접지면을 향해 주빔이 25°의 기울기로 지향하도록 설계된 대칭 SSAIP(Strip, Slot, Air, Inverted Patch) 구조의 슬롯 결합 back-to-back 마이크로스트립 위상배열 안테나를 제안한다. 이는 Pozar가 처음 개발한 슬롯 결합 마이크로스트립 안테나의 단점인 후면방사를 이용할 수 있도록, 급전선 양쪽에 슬롯과 안테나를 대칭시켜 양방향에 동일한 방사패턴을 갖도록 한 것이다. 그리고 이 배열 안테나는 도로 환경에 따라 안테나 방사패턴에서 주빔의 틸트각을 조정할 필요성이 있을 때 이를 구현할 수 있도록 위상기(phase shifter)와 결합된다.

안테나는 공동모델^{[3],[4],[5]}을 이용하여 해석한 후 이를 이용하여 단일 대칭 슬롯 결합 안테나에 대해 입력 임피던스와 반사손실을 구한다. 공동법으로 구한 파라미터는 다시 앙상블을 이용하여 최적화하여 설계목표인 IMT-2000의 주파수대역을 만족하도록 조정한다. 그리고 이 최적화된 파라미터를 이용하여 배열 안테나를 설계, 제작한다.

II. 공동법을 이용한 슬롯 결합 안테나의 해석

공동모델을 이용하여 현상의 물리적 이해를 유지하면서 간단한 계산을 얻기 위해 그림 1과 같은 구조의 슬롯 결합 마이크로스트립 안테나를 고려한다^[4]. 주모드는 TM₁₀ 모드이다.

단일 대칭 슬롯 결합 안테나의 구조는 급전선로를 중심으로 대칭구조를 이루므로 그림 1과 같이 한쪽 면만을 해석한다. 먼저, 그림 1에서 패치의 주변을 따른 네 개의 자기력과 z=0과 t에 있는 두 개의 전기력에 의해 경계를 이룬 공동으로써 마이크로스트립 안테나를 고려한다. 슬롯에 위치한 자기 전류원 \vec{M} 은 $\vec{M} = 2 \vec{E}_a \times \hat{z}$ 라는 등가원리를 이용하여 결정된다^[6]. 여기서 \vec{E}_a 는 슬롯 개구면의 전장이며 식(1)과 같다.

$$\vec{E}_a = \frac{V_0}{W_a} \frac{\sin k_a(L_a/2 - |y - y_0|)}{\sin(k_a L_a/2)} \hat{x} \quad (1)$$

$$x_0 - W_a/2 \leq x \leq x_0 + W_a/2$$

$$y_0 - L_a/2 \leq y \leq y_0 + L_a/2$$

여기서 슬롯 개구면의 파수 $k_a = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_{r2} + \epsilon_{r3}}{2}}$ 는 근사적으로 개구면에 인접한 두 영역의 파수에 평균을 취하여 구한다. 전체 체적 공동으로 전장의 z 성분을 얻기 위해, 자기 전류원은 슬롯 위의 체적에

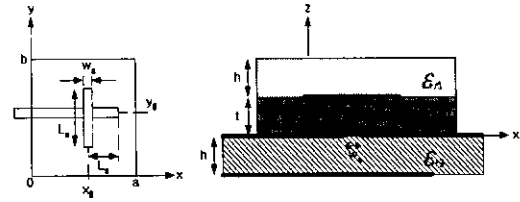


그림 1. 단일 대칭 슬롯 결합 안테나의 한쪽 구조 및 평면도

서 균일하게 분포하는 것으로 가정한다.

공동에서의 전자장 \vec{E}^i 와 \vec{H}^i 는 주 모드인 TM₁₀에 대해 식(2)~식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{E}^i = A \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \hat{z} \quad (2)$$

$$\vec{H}^i = B \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \hat{y} \quad (3)$$

$$A = \frac{8\pi V_0}{k^2 - (\pi/a)^2} \frac{\sin(\pi x_0/a)}{ba^2} \cdot \frac{\text{sinc}(\pi W_a/2a)}{ik_a \sin(k_a L_a/2)} [1 - \cos(k_a L_a/2)] \quad (4)$$

$$B = j\left(\frac{a}{\pi}\right) \omega \epsilon_{r2} \epsilon_0 A \quad (5)$$

그림 2는 단일 대칭 슬롯 결합 안테나의 한쪽 구조에 대한 등가회로이다. ΔV 는 접지면에서 슬롯 절단으로 인한 마이크로스트립 선로의 모드 전압의 불연속이며 식(6)과 같이 결정될 수 있다.

$$\Delta V = \int_{\text{slot}} \vec{E}_a \times \vec{h}_l \cdot d\vec{s} \quad (6)$$

여기서 \vec{h}_l 은 마이크로스트립 선로에 대한 정규화된 자장이다. 따라서 마이크로스트립 선로에서 개구면을 바라보았을 때 어드미턴스 $Y_l = Z_l^{-1} = (Y_{ap} + Y_{ant}) \Delta V^{-2}$ (여기서 Y_{ap} 는 슬롯 개구면의 어드미턴스, Y_{ant} 는 안테나의 어드미턴스)이며 입력 임피던스

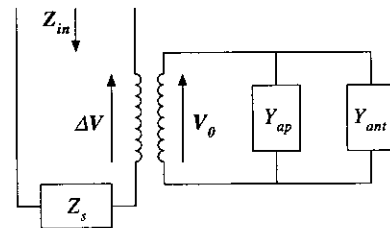


그림 2. 단일 대칭 슬롯 결합 안테나의 한쪽 구조에 대한 등가회로

스는 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$Z_{in} = Z_l + Z_s = Z_l - jZ_c \cot(k_l L_s) \quad (7)$$

여기서 L_s 는 개방회로 스테르브 길이이며, Z_s 는 개방회로 스테르브의 임피던스, k_l 은 마이크로스트립 선로의 파수이다.

III. 대칭 SSAIP 배열 안테나 설계

IMT-2000 디지털 통신표준은 상향 링크에서 1.885~2.025GHz, 하향 링크에서 2.110~2.200GHz의 주파수 범위를 사용할 예정이다. 상향 링크와 하향 링크를 포함하기 위해 안테나는 16% 이상의 대역폭에서 동작해야 한다.

기존의 마이크로스트립 패치 안테나는 3% 이하의 비교적 좁은 동작 대역폭을 갖고 한 기판 위에서 급전선로와 함께 제작되었다. Pozar^[6]에 의해 제안된 슬롯 결합 마이크로스트립 안테나는 방사소자가 급전선로와 다른 평면에 제작됨으로써 방사패턴을 개선시켰으며, Zucher는 마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭 성능을 증가시키는 SSAIP 또는 SSFIP의 새로운 개념을 제안하였다. 그는 이 기술이 900MHz에서 20% 이상의 대역폭을 얻을 수 있음을 증명하였다^[7]. 본 연구에서는 2GHz에 대해 대칭 SSAIP 구조를 이용하여 안테나의 대역폭을 향상시키면서 양방향에 동일한 방사패턴을 갖는 안테나를 설계하고자 한다.

1. 단일 대칭 SSAIP 소자

단일 대칭 SSAIP 소자의 구조를 그림 3에 나타

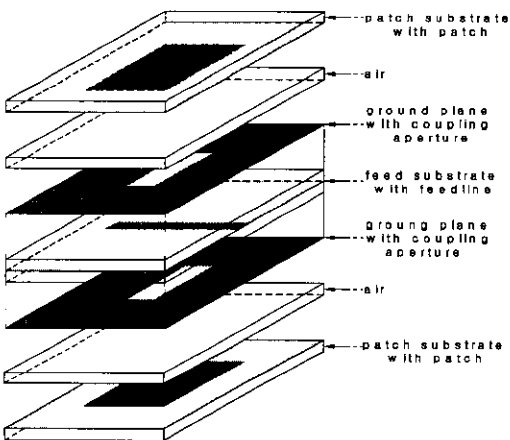


그림 3. 단일 대칭 SSAIP 소자의 분해 조립도

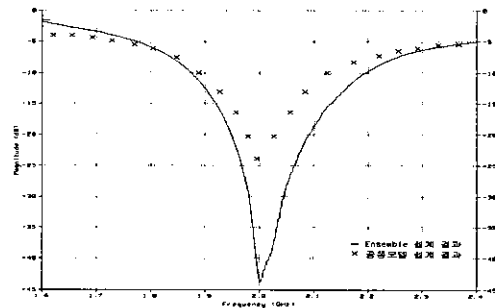
내었다. 이 소자는 급전선로를 중심으로 양쪽 유전체 기판의 접지면에 슬롯, 저 손실 저 유전율을 갖는 공기층, 그리고 유전체 기판의 다른 부분의 아래에 역 방사패치를 대칭시킨다. 양쪽의 방사패치는 접지면의 슬롯을 통해 급전선로에 대해 개구면 결합되어 양쪽에 동일한 방사패턴을 발생시킨다.

그림 3의 단일 대칭 SSAIP의 설계에 사용된 네 개의 기판은 유전율 $\epsilon_r=2.5$, 기판두께 $h=1.58\text{mm}$

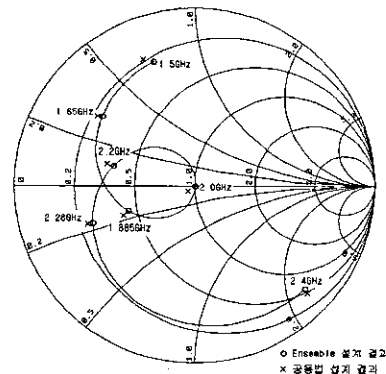
표 1. 공동법으로 구한 초기값과 이상블로 최적한 파라미터의 비교

(단위 : mm)

파라미터	공동법	이상블
50Ω 전송선로 스테르브 길이 L_s	17.8	17.6
50Ω 전송선로 스테르브 폭 W_s	2.4	2.4
슬롯 개구면 길이 L_a	45.8	48.4
슬롯 개구면 폭 W_a	3.6	4
패치 길이 a	50	48
패치 폭 b	60	60
Air층 두께 t	11.0	11.0



(a)



(b)

그림 4. 단일 대칭 SSAIP 안테나에 대해 공동법과 이상블로에 의해 계산된 방사손실 및 입력 임피던스 (a) 방사손실 (b) 입력 임피던스

인 TACONIC사의 TLC-9-0620이다.

단일 대칭 SSAIP를 위한 파라미터는 먼저 공동법을 적용하여 구하며 이를 초기값으로 앙상블을 사용하여 최적화한다. 표 1은 공동모델에서 구한 파라미터와 앙상블에서 최적화한 파라미터를 비교한 것이며 그림 4는 이 파라미터를 이용하여 계산된 반사손실 및 입력 임피던스이다.

그림 4에서 보인 것처럼 공동법으로 구한 결과를 모의실험한 경우 단일 대칭 SSAIP 안테나는 2GHz에서 정합되지 않고 임피던스 대역폭도 1.89~2.12 GHz로 설계대역을 만족하지 않는다. 따라서 공동법으로 구한 파라미터를 초기값으로 앙상블로 최적화하였으며, 그 결과 안테나는 2GHz에서 정합되었고 임피던스 대역폭은 1.88~2.2GHz, 비대역폭은 약 16%를 얻었다. 이것은 만족스러운 결과이므로 단일 소자는 4-소자 선형배열로 조합된다.

2. 4-소자 선형 배열의 설계

본 연구에서는 대칭 SSAIP 배열을 이용하여, 4-소자 선형 배열 안테나가 제작된다. 설계목표는 인접 소자 사이에서 균일 위상 천이를 유도하여 25° 빔 틸트를 얻고 주빔보다 -10dB 이상에서 부엽 레벨을 갖도록 하는 것이다. 그림 5는 본 연구에서 설계한 배열안테나의 평면도와 전력분배기를 나타낸다. 전력분배기의 설계에 사용된 기판은 유전율 4.5, 기판두께 1.58mm인 FR-4 에폭시 기판이며, 배열 안테나 설계에 사용된 기판은 단일 안테나와 동일하다.

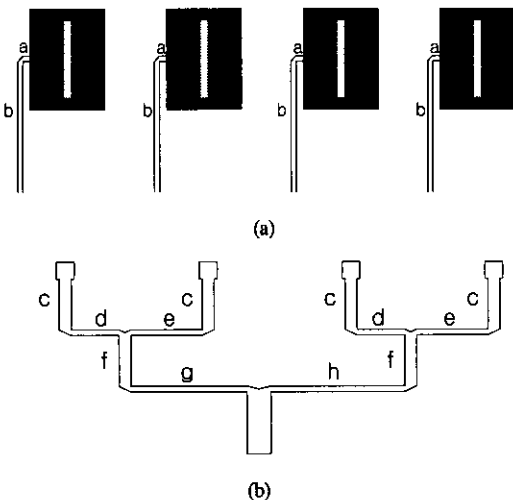


그림 5. 인접 소자 사이에서 진행형 위상천이를 갖는 4-소자 대칭 SSAIP 배열 안테나 (a) 슬롯 개구면과 패치 (b) 전력분배기

표 2. 병렬 급전 회로망의 차원

구간	a	b	c	d	e	f	g	h
기능	T line	T line	1/4 transf	T line	T line	1/4 transf	T line	T line
Zohm	50	50	70.7	100	100	70.7	100	100
Lmm	8.5	87.5	20.1	18.4	24.4	20.7	37.7	49.6
Wmm	2.41	2.41	1.56	0.68	0.68	1.56	0.68	0.68

소자의 중심 사이의 간격은 그레이팅 로브가 발생되지 않도록 $0.6 \lambda_0$ 로 설계하였다. 그리고 T-결합 전력분배기를 이용하여 $\theta_0=25^\circ$ 의 빔 틸트를 얻기 위한 위상 천이의 양은 $\beta=2\pi/\lambda_0 \sin \theta_0=-91.3^\circ$ 에 의해 주어진다. 입력 임피던스 정합을 얻고 요구된 위상 천이를 제공하기 위해, 병렬 위상 급전 회로망 소자는 표 2에서 보인 것과 같이 선택되었다.

IV. 실험 결과

그림 6은 그림 3의 구조를 갖는 단일 대칭 안테나를 4-소자 선형 배열로 제작한 대칭 SSAIP 배열 안테나의 구조이며, 그림 7은 안테나 방사패턴의 지향각을 25°를 기준으로 $\pm 10^\circ$ 틸트하기 위해 본 실험에 사용된 5비트 디지털 위상기의 레이아웃이다^[8]. 그림 6에서 네 개의 SMA 컨넥터는 그림 5(a)의 평면도에 나타낸 급전선로와 위상기를 연결시키기 위한 단자이다. 그리고 급전선로를 중심으로 양쪽 접지면에 슬롯을 두었으며, 기판 사이의 유전체로 공기를 사용하기 위해 기판 사이를 11mm 띄운 후 나사로 고정하였고, 양쪽에 역패치를 두었다. 안테나의 전체 크기는 $371 \times 173 \times 28.32 \text{mm}^3$ 이다.

그림 8(a)는 대칭 SSAIP 배열에 대해 앙상블에서 모의실험한 반사손실이고, 그림 8(b)는 전력분배기

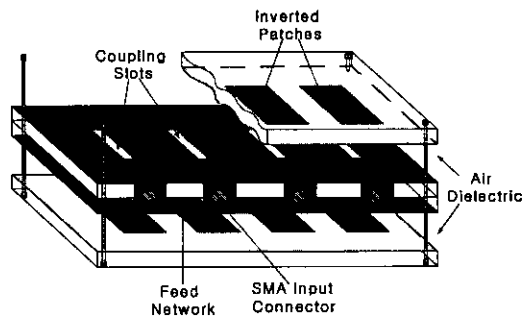


그림 6. 대칭 SSAIP 4-소자 배열 안테나의 구조

를 결합하여 측정된 반사손실을 보인다. 실제 측정했을 때 중심주파수는 1.99GHz로 모의실험의 2GHz와 10MHz 오차로 일치하였다. 임피던스 대역 폭은 모의실험의 경우 480MHz(1.79~2.27GHz)이고, 측정 결과는 420MHz(1.81~2.23GHz)로 양호하게 일치하였으며, IMT-200의 상·하향 링크 주파수를 모두 포함하였다.

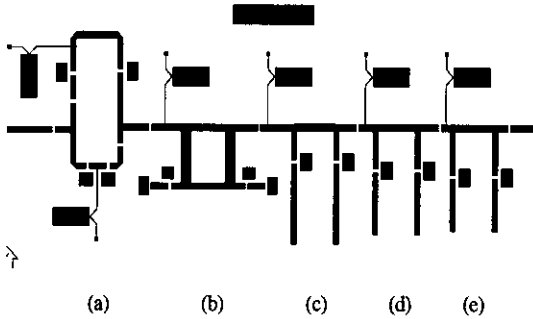


그림 7. 5비트 디지털 위상기의 레이아웃
(a) 180° 비트 (b) 90° 비트 (c) 45° 비트
(d) 22.5° 비트 (e) 11.25° 비트

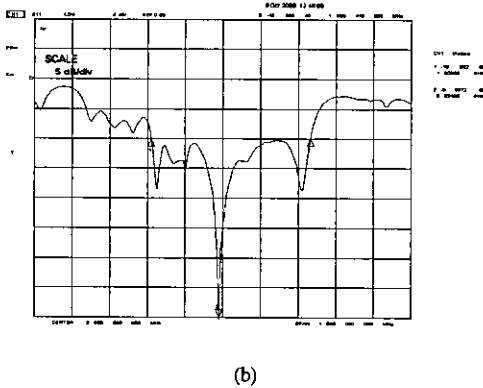
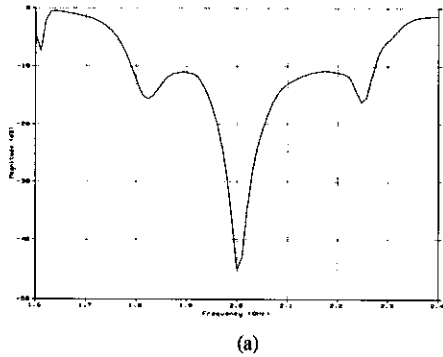


그림 8. 대칭 SSAIP 배열 안테나에 대한 반사손실
(a) 모의실험 결과 (b) 측정값

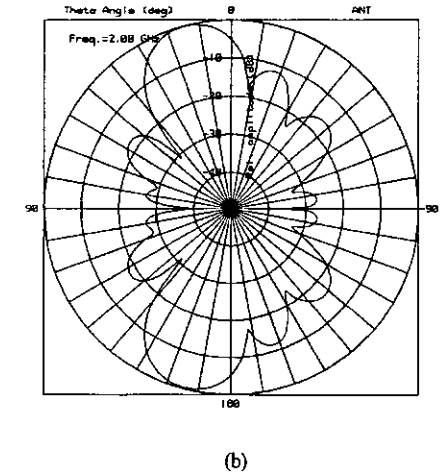
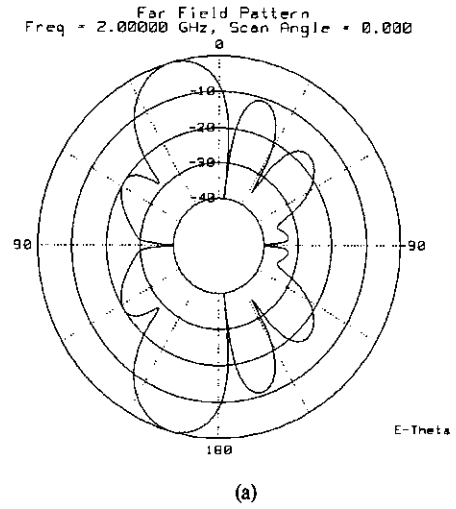
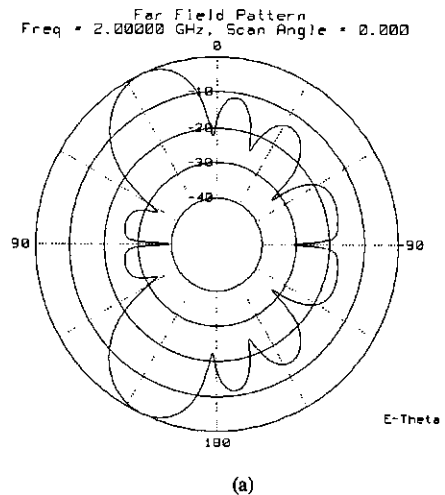
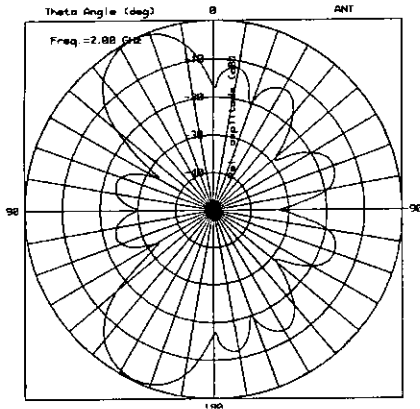


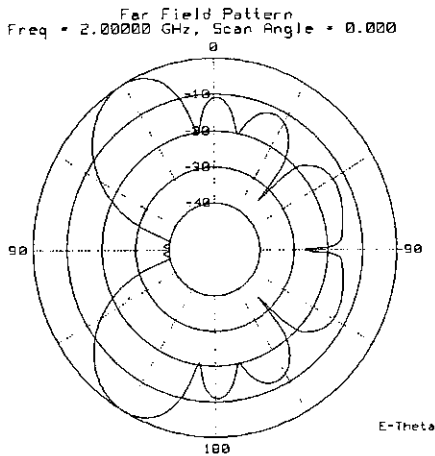
그림 9. 지향각이 15.47° 인 경우 모의실험과 측정 방사패턴 (a) 모의실험 (b) 측정



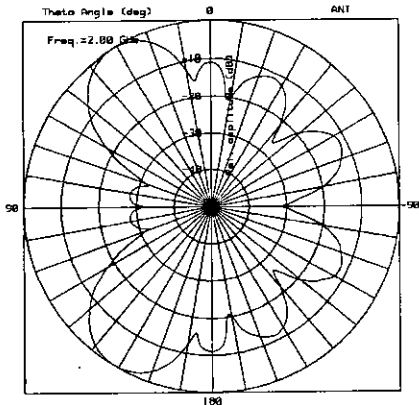


(b)

그림 10. 지향각이 25° 인 경우 모의실험과 측정 방사패턴 (a) 모의실험 (b) 측정



(a)



(b)

그림 11. 지향각이 31.78° 인 경우 모의실험과 측정 방사패턴 (a) 모의실험 (b) 측정

표 3. 방사패턴에 대한 설계값, 모의실험, 측정결과

설계 지향각 (deg)	지향각 (deg)		3dB 빔폭 (deg)		최대부엽 레벨(dB)		지향각 오차(deg)	
	모의	측정	모의	측정	모의	측정	모의	측정
15.47	15.5	15.0	21.25	22.75	-10.82	-11.38	+0.03	-0.47
18.56	19.0	18.5	21.75	23.25	-11.24	-11.19	+0.44	-0.06
21.77	22.0	21.0	22.75	24.50	-11.30	-11.21	+0.23	-0.77
25	24.5	25.5	22.50	24.50	-11.23	-11.32	-0.50	+0.50
28.36	27.5	28.5	23.00	24.75	-11.08	-10.76	-0.86	+0.14
31.78	30.5	31.5	23.50	25.00	-10.88	-10.52	-1.28	-0.23
35.39	35.0	35.0	24.00	25.75	-9.90	-9.23	-0.39	-0.39
평균	-	-	22.68	24.36	-10.92	-10.80	±0.53	±0.37

제작된 대칭 SSAIP 배열 안테나는 안테나 전단에 제작한 위상기를 부착하여 위상배열 안테나의 주빔의 지향각이 25° 를 기준으로 약 ±10° (15~35°) 틸트할 수 있도록 한다. 위상기의 출력위상을 기준위상에 대해 각각 33.75°, 22.5°, 11.25°, 0°, -11.25°, -22.5°, -33.75° 위상 지연함으로써 위상배열 안테나의 지향각을 각각 15.47°, 18.56°, 21.77°, 25°, 28.36°, 31.78°, 35.39° 에 형성시킬 수 있다.

그림 9~그림 11은 중심주파수 2GHz에서 지향각이 15.47°, 25°, 31.78° 인 경우 모의실험과 측정 결과에 대한 방사패턴을 예를 들어 비교한 것이며, 표 3은 각각의 지향각에 대한 설계값, 모의실험, 그리고 측정결과를 비교한 것이다. 표 5에서 보인 것처럼 지향각은 모의실험에서 평균 ±0.53°, 측정결과에서 평균 ±0.37° 의 위상오차로 설계값과 잘 일치하였다. 최대 부엽 레벨은 모의실험과 측정결과 모두 지향각이 35.39° 인 경우를 제외하고 주빔과 -10dB 이상 차를 보여 설계값과 잘 일치하였다. 3dB 빔폭은 전반적으로 모의실험보다 측정치가 더 넓게 형성되었으며, 모의실험과 측정결과 모두 지향각이 클수록 3dB 빔폭이 더 넓게 형성됨을 볼 수 있다. 모의실험과 측정결과 사이의 방사패턴에서 오차가 발생한 원인은 실험으로 측정된 안테나는 접지면이 유한한 크기인 반면에 이상불을 이용한 모의실험의 경우는 무한 접지면이기 때문이다.

V. 결론

본 연구에서는 2-섹터 셀 사이트에서 지향성 안테나 또는 중계기 안테나에 사용할 수 있는 대칭

슬롯 결합 마이크로스트립 위상배열 안테나를 설계 제작하였다. 이것은 Pozar가 개발한 슬롯 결합 마이크로스트립 안테나의 단점인 후면방사를 이용할 수 있도록 급전선 양쪽에 슬롯과 패치를 대칭시켜 양 방향에 동일한 방사패턴을 갖도록 한 것이다. 그리고 안테나 전단에 위상기를 부착하여 도로환경에 따라 15~35° 범위에서 빔을틸트할 수 있도록 하였다.

설계순서는 먼저, 단일 대칭 슬롯 결합 안테나의 임피던스 대역폭이 IMT-2000의 상, 하향 주파수를 포함하도록 설계한 후 대칭 슬롯 결합 4-소자 배열로 구성되었다.

실험 결과 안테나는 임피던스 대역폭이 21%였으며, 방사패턴은 양방향에 동일하게 형성되었다. 그리고 지향각 오차는 평균 $\pm 0.37^\circ$ 로 설계값과 잘 일치하였으며, 최대 부엽 레벨은 평균 -10.80dB로 설계목표를 만족하였다. 따라서, 제안된 안테나는 IMT-2000의 상·하향 주파수에서 모두 이용 가능하며 도로를 따라 설치하는 이동통신 기지국 안테나 또는 중계기 안테나로 적합할 것이다.

참 고 문 헌

[1] M. E. Becker, M. E. Bialkowski, and M. J. Rydstrom, "Design of Microstrip Sub-Array for a DCS1800 Base Station Flat Panel Antenna", *Proc. APCC98*, pp. 428-432, 1998.

[2] H. Iwasaki, "A Back-to-Back Rectangular Patch Antenna Fed by a CPW", *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, Vol. 46, No. 10, pp. 1527-1530, Oct. 1998.

[3] M. Himd, O. Lafond, S. Laignier, and J. P. Daniel, "Extension of Cavity Method to Analyse Aperture Coupled Microstrip Patch Antenna with Thick Ground Plane", *Electron. Lett.*, Vol. 34, No. 16, Aug. 1998.

[4] M. Himdi, J. P. Daniel, and C. Terret, "Analysis of Aperture-Coupled Microstrip Antenna Using Cavity Method", *Electron. Lett.*, Vol. 25, No. 6, pp. 391-392, Mar. 1989.

[5] 김태현, 전계석, "대칭 슬롯 결합 Back-to-Back 마이크로스트립 배열 안테나의 설계" *한국통신학회논문지*, 제25권, 제9B호, pp. 1511-1517, Sep. 2000.

[6] D. M. Pozar, "Analysis of an Infinite Phased

Array of Aperture Coupled Microstrip Patches", *IEEE Trans. Antenna Propagat.*, Vol. 37, No. 4, pp. 418-425, Apr. 1989.

[7] J. F. Zurcher, "The SSFIP: Global Concept for High Performance Broadband Planar Antennas", *Microstrip Antennas, The Analysis & Design of Microstrip Antennas & Arrays*, pp. 182-184, New York, IEE, 1995.

[8] 김태현, 전계석, "위상배열 안테나를 위한 저 전력용 5 비트 디지털 위상기의 설계", *한국통신학회논문지*, 제25권, 제2B호, pp. 321-328, Feb. 2000.

[9] J. R. James and P. S. Hall, *Handbook of Microstrip Antennas*, Peter Peregrinus, Chap. 3, 1989.

[10] C. A. Balanis, *Antenna Theory*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Chap. 14, 1997.

김 태 현(Tae-Hyoun Kim)

정회원



1992년 2월 : 경희대학교
전자공학과 공학사
1994년 2월 : 경희대학교
전자공학과 공학석사
2001년 3월 : 경희대학교
전자공학과 공학박사

1999년 3월~현재 : 세림정보기술(주) 선임연구원
<주관심 분야> 위상배열 안테나, 이동통신

전 계 석(Kye-Suk Jun)

정회원



1983년 8월 : 연세대학교
전자공학과 박사
1988년 1월~1991년 12월 :
경희대학교 학생처장
1979년 3월~현재 : 경희대학교
전자정보학부 정교수

1998년 12월~2000년 12월 : 경희대학교 공과대학장
2000년 1월~2000년 12월 : 한국통신학회 부회장
2001년 1월~현재 : 한국통신학회 수석부회장
<주관심 분야> 위상배열 안테나, 이동통신, 마이크로파소자