

개구 결합 구조를 갖는 PCS 기지국용 마이크로스트립 정형 빔 배열 안테나

An Aperture-coupled Microstrip Shaped-beam Array Antenna for the PCS Basestation

여운식 · 김광조 · 강승택 · 김형동

Woon-Sik Yeo · Kwang-Jo Kim · Sung-Tek Kahng · Hyeong-Dong Kim

요 약

본 논문에서는 그라운드면 상의 개구를 통해 마이크로스트립 패치로 결합을 일으키는 구조를 갖는 PCS 기지국용 정형 빔 배열 안테나 설계와 제작에 관하여 다룬다. 최적의 정형 빔 패턴은 안테나 합성법으로 얻어졌다. 배열된 패치들 사이에서의 결합을 고려한 배열 안테나와 급전회로는 CAD tool을 이용하여 설계되었다. 급전 회로는 최적의 정형 빔 패턴을 얻기 위해서 Wilkinson 전력 분배기를 이용하여 설계되었다. 설계 결과와 측정 결과가 비교되어진다.

Abstract

This paper presents the design and fabrication of a shaped-beam array antenna which will be used for a PCS basestation using structure that is coupled to a microstrip line by an aperture on the intervening ground plane. The shaped-beam pattern is obtained by an antenna synthesis method. An array antenna considering the mutual coupling between array elements (patches) and a feeding network are designed by CAD tools. The feeding network is designed by using the Wilkinson power divider to obtain the optimized shaped-beam. The designed results are compared with the measured data.

I. 서 론

셀룰라 이동통신 시스템에서 안테나는 기지국과 단말기 사이의 무선 링크 특성을 결정하는 가장 중요한 요소로 여겨지고 있다. 이동통신의 급격한 수요 증가로 인해 대도시에서는 통신 채널의 부족이 심각한 문제로 등장하게 되었고, 그에 대한 요구로 주파수의 효과적인 재활용 기술이 대두되고 있다.

셀룰라 시스템에서는 주파수 재활용이 가장 중요한데, 주파수 재활용의 효율성은 바로 기지국 안테나의 방사 특성과 매우 밀접한 관련이 있다. 주파수 재활용의 효율을 높이기 위해서 안테나 주 빔의 틸팅과 정형 빔 패턴의 개념을 사용할 수 있다. 무선 통신 시스템의 성능은 기본적으로 원하지 않는 잡음에 대해 원하는 신호의 비에 비례하는데, 잡음은 열 잡음이나 기타 기상 현상 및 인위적인 잡음과 원하지 않는 간섭 신호로 나눌 수 있다. 위성 통신과

「본 논문은 정보통신 연구관리단 1996년도 대학기초 연구지원사업(96170-RT)으로 지원되었음」
 한양대학교 전기전자공학부(Dept. of Electrical and Computer Engineering, Hanyang Univ.)
 · 논문 번호 : 970913-059
 · 수정완료일자 : 1997년 11월 5일

같은 장거리 통신에서는 열 잡음이나 기타 기상 현상 및 인위적인 잡음이 중요시되는 “Noise-limited system”이고 본 논문에서 관심이 있는 셀룰라 통신 시스템은 원하지 않는 신호의 간섭이 중요시되는 “Interference-limited system”이다. 이동통신의 급격한 수요 증가를 충족하기 위해 보통 대도시에서는 셀이 점점 밀집하게 되는데, 이에 따라 발생하는 원하지 않는 간섭 신호의 영향이 셀룰라 시스템의 전체 성능을 결정짓는 가장 중요한 요소가 된다. 간섭의 정도는 주어진 안테나 패턴에서 특정지역의 감쇄 곡선에 의해 시스템 설계자에 관계없이 자연적으로 결정된다. 그러나 주 빔의 틸팅을 사용하므로써 간섭 신호를 어느 정도 줄일 수 있을 뿐 아니라 서비스 셀에는 균일한 방사를 하도록 하고 다른 근접 셀로는 방사를 줄이게 하는 정형 빔 안테나를 사용하여 간섭을 효과적으로 줄일 수 있어 셀룰라 시스템의 성능을 월등히 향상시킬 수 있는 가능성이 연구되고 있다. 본 논문에서는 근래에 안테나 분야에 널리 사용되고 있는 마이크로 스트립 패치 구조를 이용하여 PCS 기지국용 정형 빔 안테나를 설계하였다. 설계된 안테나는 7개의 요소 안테나가 수직으로 배열되어 있는 방사부와 서비스 셀 내에서 균등한 전계 분포를 갖는 $\text{csc}(\theta)$ 의 정형 빔 패턴을 갖도록 방사부를 급전하는 급전회로 부분으로 이루어져 있다.

II. 정형 빔 패턴 합성

정형 빔 안테나 기술은 주파수 재사용 효율을 높일 수 있는 기술이다. 셀룰러 시스템에서 사용되는 기지국 안테나는 인접 셀에는 가능한 한 적은 양의 전자파를 방사하고 자기 서비스셀에는 균일하게 충분한 신호가 요구되어진다¹⁾. 이러한 방사 특성은 수직으로 배열된 안테나를 사용하여 각 안테나의 급전 크기가 적절하게 조정 된 정형 빔 패턴에 의해서 얻어질 수 있다. 배열 안테나의 이론에 의하면 안테나 패턴은 각각의 요소 안테나 급전 크기에 의해 결정되는데 원하는 안테나 패턴은 합성 기술을

사용하여 요소 안테나의 급전 크기를 결정 함으로써 가능하다. 셀룰러 이동통신에서는 서비스 셀 내에서 안테나와 가입자 사이의 거리에 관계없이 전체의 세기가 일정한 $\text{csc}(\theta)$ 의 전계 패턴이 요구되어진다. 본 논문에서는 $\text{csc}(\theta)$ 패턴을 합성하기 위해 Woodward-Lawson sampling 방법을 사용했다^{2)-[6]}. 식 (1)은 Woodward-Lawson sampling 방법에 관계된 급전 전류 식에 부엽 준위를 -20 dB 이하로 내리기 위해 가중치를 곱한 것으로써 원하는 패턴의 표본값 $f(\cos(\theta_n))$ 을 이용해 전류 분포를 얻어낸다.

$$I_m = \left[\frac{1}{P} \sum_{n=-M}^M f(\cos(\theta_n)) e^{-j\pi(z_m/\lambda)w_n} \right] \times \left[\frac{\cos^2\left(\frac{z_m}{2\lambda}\right) + 2.5}{3.5} \right], \quad (1)$$

여기서 P 는 안테나 요소의 개수이고, Z_m 은 안테나 요소의 위치, w_n 은 원하는 패턴의 표본 점, $f(\cos(\theta_n))$ 은 원하는 패턴의 표본 값이다. 식 (1)을 이용하여 얻어진 전류의 크기와 위상과 Array factor가 각각 표 1과 그림 1에 나타나 있다.

표 1. $\text{csc}(\theta)$ 의 빔 패턴을 합성하는 전류 분포

Table 1. The current distribution corresponding to $\text{csc}(\theta)$ beam pattern.

안테나요소	요소의 위치	전류의 크기	전류의 위상
1	$-3\lambda/2$	0.1200	43.9160°
2	$-\lambda$	0.2380	32.8660°
3	$-\lambda/2$	0.6150	40.4130°
4	0	1.0000	0.0000°
5	$\lambda/2$	0.6150	-40.4130°
6	λ	0.2380	-32.8660°
7	$3\lambda/2$	0.1200	-43.9160°

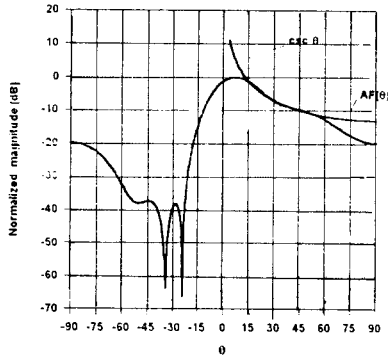


그림 1. $csc(\theta)$ 분포를 갖는 Array factor
 Fig. 1. An array factor with $csc(\theta)$ pattern.

III. 안테나 요소 및 배열 설계

마이크로 스트립 안테나는 보통 전송선 급전 구조나 프로브 급전 구조 등이 주로 널리 알려져 있으나 최근에 개구 결합 안테나 구조가 소개되면서 이에 대한 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 이 구조는 기존의 전송선 급전 구조나 프로브 급전 구조에 비해 급전 회로 설계를 설계하는데 충분한 공간을 갖게 되고, 방사판과 급전회로를 충분히 차폐시킴으로써 불필요한 결합을 줄일 수 있다. 또한 안테나 부분과 급전회로의 유전체 특성 데이터를 독립적으로 결정할 수 있어 방사 효율을 높일 수 있다. 구현 가능한 임피던스 범위는 5~50 %이고, 후방 방사

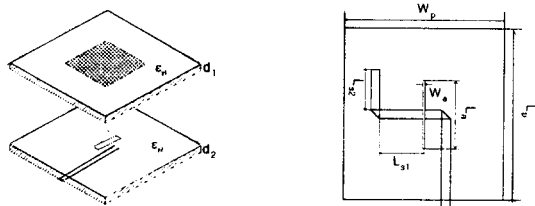


그림 2. 개구결합 요소 안테나의 구조
 Fig. 2. The structure of an aperture coupled antenna.

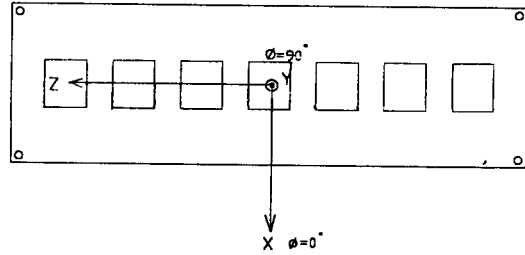


그림 3. 개구결합 배열 안테나의 좌표
 Fig. 3. The coordinates of an aperture coupled array antenna.

특성이 우수하다. 이런 장점들 때문에 본 논문에서 개구 결합 구조를 이용하여 기지국 안테나를 설계하였다. 안테나의 구조와 좌표계는 각각 그림 2와 그림 3에 잘 나타나 있다^{[7]-[9]}. 그림 2에서 패치의 크기를 조정해서 주어진 동작 주파수에서 공진을 일으키도록 설계해야 하며, 50 Ω 급전 선으로부터 개구를 통한 방사 패치와의 임피던스 정합을 이루기 위해서는 개구의 위치, 형태 및 크기를 잘 설계해야 한다^[7]. 본 논문에서는 마이크로 스트립 패치 안테나 설계를 널리 사용되고 CAD 프로그램인 Ensemble을 이용하여 안테나를 설계하였다. 설계에 사용된 기판은 방사판에 Taconic사의 TLY9, 급전 회로에 Taconic사의 TLY5를 사용했다. 사용된 기판의 데이터와 설계된 요소 안테나의 수직 평면과 수평 평면에서의 전계 패턴이 표 2와 그림 4, 그림 5에 각각 나타나 있다. 설계된 요소 안테나를

표 2. 설계에 사용된 테플론 기판
 Table 2. The teflon PCB.

	방사판	급전회로판
기판	TLY9	TLY5
상대유전율(ϵ_r)	2.2	2.5
두께	3.175 mm	1.143 mm
손실상수 $\tan(\delta)$	0.0009	0.0015

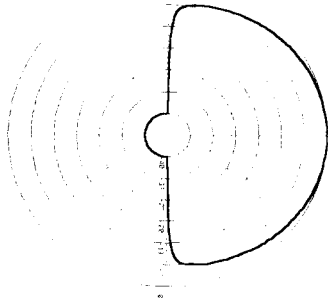


그림 4. 설계된 요소 안테나의 $\phi = 90^\circ$ 인 수직 평면에
서의 전계 패턴($f_0 = 1.815$ GHz)

Fig. 4. The E-field pattern at vertical plane, $\phi = 90^\circ$ of an element antenna($f_0 = 1.815$ GHz).

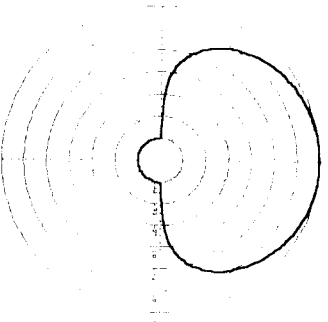


그림 5. 설계된 요소 안테나의 $\theta = 90^\circ$ 인 수직 평면에
서의 전계 패턴($f_0 = 1.815$ GHz)

Fig. 5. The E-field pattern at vertical plane, $\theta = 90^\circ$ of an element antenna($f_0 = 1.815$ GHz).

이용하여 배열 구조를 설계하기 위해서는 각 요소 안테나들간의 상호 결합을 고려한 후 원하는 패턴을 형성할 수 있는 전류 분포를 다시 얻어야 한다^[10]. 상호 결합을 고려하는 전류 분포의 관계식이 식 (2)에 나타나 있다.

$$I_s = [Z_p^{-1} + Z_t^{-1}] \times I_m \quad (2)$$

I_s 는 상호 결합을 고려한 후 얻어진 급전 전류 분포이고, Z_p 는 상호 임피던스로, Ensemble을 이용하여 계산한 후 얻어진 데이터이다. Z_p 의 데이터는 표 3에 주어져 있다. Z 는 Z_p 와 차원이 같은 단위 행렬이다. I_m 은 표 1에서 보여진 상호 결합을 고려하지 않은 급전 전류 분포이다. 식 (2)에 의해서 새롭게 얻어진 전류 분포는 표 4에 주어진다. 표 4를 이용하여 Ensemble로 설계된 배열 안테나의 구조와 수직 평면과 수평 평면에서의 전계 패턴이 각각 그림 6과 그림 7, 그림 8에 나타나 있다. 그림 6은 위에서 바라본 배열 안테나의 투명한 구조로써 방사관과 개구, 급전선의 일부를 나타내고 있다. 그림 7은 설계된 배열 안테나의 수직 평면에서의 방사 패턴으로 원하는 서비스셀 내에서 $\text{csc}(\theta)$ 의 분포를 갖는 것을 볼 수 있다. 그림 8은 수평 평면에서의 방사 패턴으로 3 dB 빔폭이 약 80° 가 됨을 볼 수 있다.

표 3. 안테나의 상호 임피던스(7×7행렬)

Table 3. The mutual impedance(Z_p).

단자	1		2		3		4		5		6		7	
	$R_c(Z_p)$	$I_m(Z_p)$	$R_c(Z_p)$	$I_m(Z_p)$	$R_c(Z_p)$	$I_m(Z_p)$	$R_c(Z_p)$	$I_m(Z_p)$	$R_c(Z_p)$	$I_m(Z_p)$	$R_c(Z_p)$	$I_m(Z_p)$	$R_c(Z_p)$	$I_m(Z_p)$
1	1.03	-0.04	-0.18	0.06	0.09	-0.12	-0.05	0.11	0.03	-0.10	-0.01	0.09	0.01	-0.07
2	-0.18	0.06	1.04	-0.06	-0.18	0.09	0.09	-0.14	-0.05	0.13	0.03	-0.11	-0.01	0.09
3	0.09	-0.12	-0.18	0.09	1.03	-0.08	-0.17	0.10	0.09	-0.14	-0.05	0.13	0.03	-0.10
4	-0.05	0.11	0.09	-0.14	-0.17	0.10	1.03	-0.09	-0.17	0.10	0.09	-0.14	-0.05	0.11
5	0.03	-0.10	-0.05	0.13	0.09	-0.14	-0.17	0.10	1.03	-0.08	-0.18	0.08	0.09	-0.12
6	-0.01	0.09	0.03	-0.11	-0.05	0.13	0.09	-0.14	-0.18	0.08	1.04	-0.06	-0.18	0.06
7	0.01	-0.07	-0.01	0.09	0.03	-0.10	-0.05	0.11	0.09	-0.12	-0.18	0.06	1.02	-0.04

표 4. 상호 결합을 고려한 후의 전류 분포

Table 4. The current distribution after the reduction of an effect of the mutual coupling.

안테나요소	Element 위치	전류의 크기	전류의 위상
1	$-3\lambda/2$	0.11652	40.27929°
2	$-\lambda$	0.26534	40.94212°
3	$-\lambda/2$	0.66311	37.27632°
4	0	1.00000	0.30494°
5	$\lambda/2$	0.64020	-37.06188°
6	λ	0.25010	-32.31353°
7	$3\lambda/2$	0.12926	-39.26968°

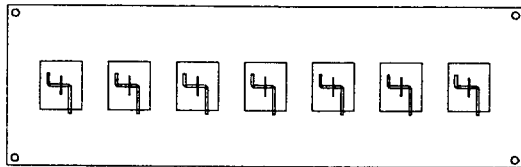


그림 6. 설계된 배열 안테나 구조

Fig. 6. The designed structure of an array antenna.

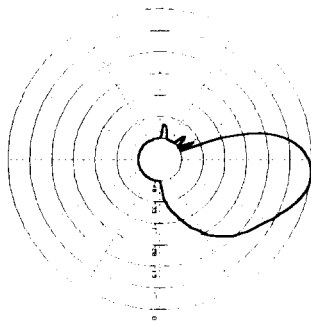


그림 7. 배열 안테나의 $\phi=90^\circ$ 인 수직 평면에서의 전계 패턴($f_0 = 1.815$ GHz)

Fig. 7. The E-field pattern at vertical plane, $\phi=90^\circ$ of an element antenna($f_0 = 1.815$ GHz).

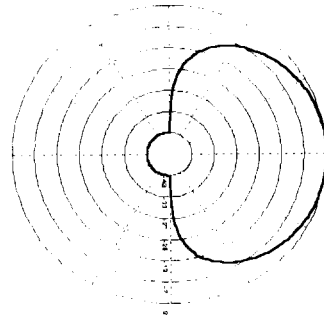


그림 8. 배열 안테나의 $\theta=90^\circ$ 인 수직 평면에서의 전계 패턴($f_0 = 1.815$ GHz)

Fig. 8. The E-field pattern at vertical plane, $\theta=90^\circ$ of an element antenna($f_0 = 1.815$ GHz).

IV. 급전 회로 설계

배열 안테나의 정형 빔 패턴을 구현하기 위해서는 표 3의 전류 분포를 형성시키는 급전회로의 설계가 필요하다. 이런 요구에 의해 본 논문에서는 Wilkinson 전력 분배기와 마이크로 스트립선을 사용하여 급전 회로를 설계하였다. Wilkinson 전력 분배기는 각 출력 단자에서 정합이 잘 되며, 두 출력 단자간의 간섭이 적다는 장점 때문에 안테나의 급전 회로에 널리 사용되고 있다^{[11]~[13]}. Wilkinson

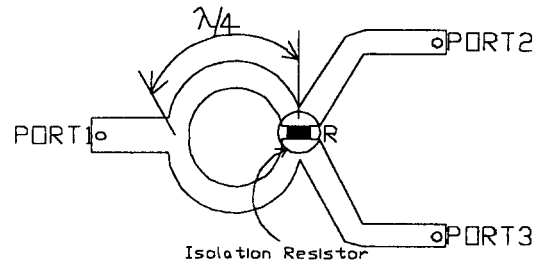


그림 9. Wilkinson 전력 분배기의 기본 구조

Fig. 9. The basic structure of the Wilkinson power divider.

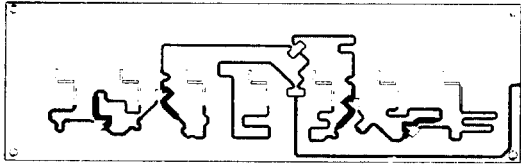


그림 10. 설계된 배열 안테나의 급전 회로
($f_0 = 1.815$ GHz)

Fig. 10. The feeding network of an array antenna($f_0 = 1.815$ GHz).

전력 분배기의 기본 구조는 그림 9에 나타나 있다.
본 논문에서는 CAD 프로그램인 SUPER COMPACT를 이용하여 표 3의 전류 분포를 형성하는 급전 회로를 설계하였다. 그림 10에 설계된 급전 회로의 구조가 나타나 있다.

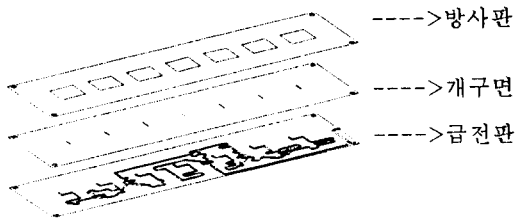


그림 11. 설계된 배열 안테나의 3차원 구조
Fig. 11. The 3D structure of an array antenna.

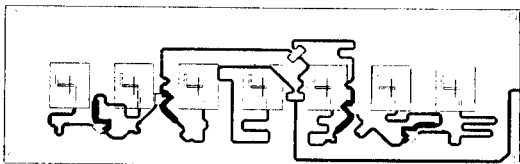


그림 12. 설계된 배열 안테나의 투명한 2차원 도식
Fig. 12. The 2D transparent view of the structure of an array antenna.

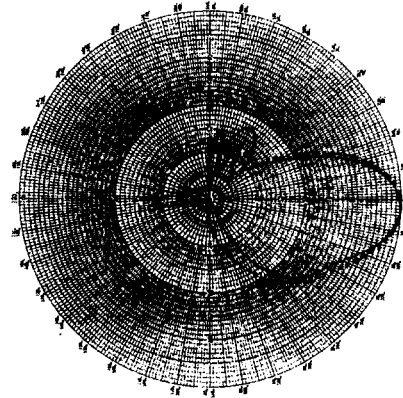


그림 13. 측정된 배열 안테나의 $\phi = 90^\circ$ 인 수직 평면에서의 전계 패턴($f_0 = 1.815$ GHz)

Fig. 13. The E-field pattern at vertical plane, $\phi = 90^\circ$ of an array antenna which is measured($f_0 = 1.815$ GHz).

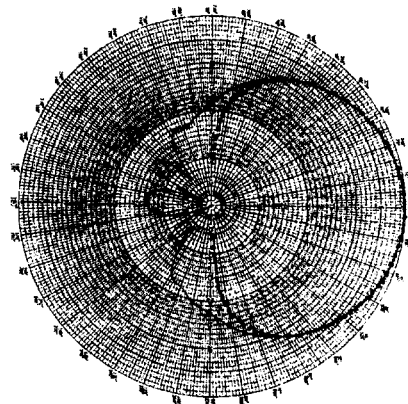
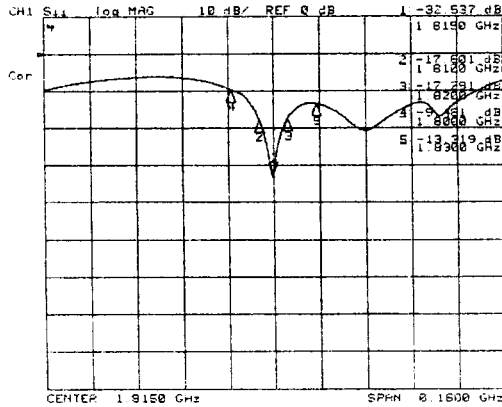


그림 14. 측정된 배열 안테나의 $\theta = 90^\circ$ 인 수평 평면에서의 전계 패턴($f_0 = 1.815$ GHz)

Fig. 14. The E-field pattern at horizontal plane, $\theta = 90^\circ$ of an array antenna which is measured($f_0 = 1.815$ GHz).



$$\begin{aligned} \epsilon_{r1} &= 2.2, \epsilon_{r2} = 2.5, d_1 = 3.175 \text{ mm}, \\ d_2 &= 1.143 \text{ mm}, W_p = 50.6 \text{ mm}, L_p = 60 \text{ mm}, \\ W_a &= 0.968 \text{ mm}, L_a = 25.05 \text{ mm}, L_{s1} = 15 \text{ mm}, L_{s2} = 15 \text{ mm} \end{aligned}$$

그림 15. 10 MHz 대역에서의 측정된 VSWR($f_0 = 1.815 \text{ GHz}$)

Fig. 15. The measured VWR in 10 MHz bandwidth($f_0 = 1.815 \text{ GHz}$).

V. 측정 결과

최종적으로 설계된 후 측정된 배열 안테나의 구조와 전계 패턴, VSWR이 각각 그림 11, 그림 12, 그림 13, 그림 14와 그림 15에 나타나 있다. 그림 13과 그림 14의 측정된 전계 패턴은 그림 7과 그림 8의 설계된 전계 패턴과 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한 패턴의 모양이 처음에 계획했던 것처럼 서비스셀로 향하는 빔이 Null이 없고 $\text{csc}(\theta)$ 빔의 형태를 가지며 간섭을 일으킬 수 있는 인접 셀로 향하는 부엽의 준위는 -20 dB 이하로 월등히 줄어들음을 관찰할 수 있다. 그림 15는 배열 안테나의 정재파비에 대한 측정치를 보여주고 있다. 그림 15에서 보는 바와 같이 중심 주파수 1.815 GHz 에서 공진이 일어나는 것을 볼 수 있다. 마커 2와 3은 10

MHz 의 주파수 대역을 나타내고 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 개구 결합 구조를 갖는 7개의 요소 안테나를 이용하여 배열 안테나를 설계, 제작하였다. 실제로 기지국 안테나가 설치되는 상황은 기지국에 따라 매우 다른 특성을 가지게 되므로 본 논문에서는 평탄한 지형을 가정하였다. 이때 바람직한 빔 패턴은 $\text{csc}(\theta)$ 빔이 되며, 이를 합성하기 위해서는 수정된 Woodward-Lawson 안테나 합성법을 사용하였다. 안테나 합성 결과에 의해 얻어진 급전 전류는 급전할 때 요소 안테나간의 상호 결합에 의해 빔 패턴이 왜곡되어 원하는 빔 패턴과 다르게 되므로 본 논문에서는 상호 결합의 영향을 고려하여 보정한 새로운 급전 전류를 최종적으로 구하였다. 상호 결합을 고려한 급전 전류를 각각의 요소 안테나에 공급하기 위해서는 급전 회로를 설계해야 하는데, 급전 회로는 Wilkinson 전력 분배기와 지연선(Delay Line)을 사용해서 원하는 전류의 크기와 위상을 공급하도록 설계, 제작하였다. 측정된 방사 패턴에서는 간섭을 일으키는 부엽 준위가 -20 dB 이하로 줄었으며, 서비스 셀로 향하는 패턴은 null이 없는 정형 빔을 갖고 있어 바람직한 정형 빔을 구현하고 있음을 관찰할 수 있다. 본 논문에서 설계, 제작된 정형 빔 기지국 안테나는 기존의 기지국 안테나에 비해 서비스 셀 내에서 균등한 전계 분포를 갖고 인접 셀로 향하는 부엽 준위가 월등히 줄어들어, 서비스가 개시되고 있는 PCS 셀 설계에 유용하게 활용될 수 있으리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] K. Fujimoto, J. R. James, *Mobile antenna systems handbook*, London: Artech house, 1994.
- [2] Warren L. Stutzman, Gary A. Thiele, *Antenna theory and design*, New York: John

wiley & Sons, 1981.

- [3] Michael J. Buckley, "Synthesis of shaped beam antenna patterns using implicitly constrained current elements," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-44, no. 2, pp. 192-197, Feb. 1996.
- [4] P. M. Woodward and J. D. Lawson, "The theoretical precision with which an arbitrary pattern may be obtained from a source of a finite size," *J. IEE, Part H*, vol. 95 pp. 363-370, Sect. III. 1948.
- [5] H. J. Orchard, R. S. Elliott, and G. J. Stern, "Optimizing the synthesis of shaped beam antenna patterns," *Proc. IEE*, vol. 132-H, pp. 63-68, Feb. 1985.
- [6] R. C. Hansen, "Array pattern control and synthesis," *Proc. IEEE*, vol 80, pp. 141-151, Jan. 1992.
- [7] Peter L. Sullivan, Daniel H. Schaubert, "Analysis of an aperture coupled microstrip antenna," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, no. 8, pp. 977-984, Aug. 1986.
- [8] Xian Hua Yang, Lotfollah Shafai, "Characteristics of an aperture coupled microstrip antennas with various radiating patches and coupling apertures," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-43, no. 1, pp. 72-78, Jan. 1995.
- [9] N. R. S. Simona, A. Sebak, and A. Ittipiboon, "Analysis of an aperture coupled microstrip antenna and circuit structure using the transmission line matrix method," *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, vol. 37, no. 4, Aug. 1995.
- [10] David M. Pozar, "Finite phased arrays of rectangular microstrip patches," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-34, no. 5, pp. 658-665, May. 1986.
- [11] Jean-françois Zurcher & Fred E. Gardiol, *Broadband patch antenna*, Norwood, MA: Artech House, pp. 88-92, 1995.
- [12] Robert E. Collin, *Foundation for Microwave Engineering*, New York: McGraw-Hill, pp. 442-450, 1992.
- [13] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Amherst: Addison-wesley pp. 391-400, 1990.

여 운 식



1973년 5월 10일생
 1996년 2월 : 한서대학교 전자공학과
 (공학사)
 1996년 3월~현재 : 한양대학교 대학
 원 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 안테나 공학, 마이크

로파 공학

김 광 조



1970년 5월 24일생
 1996년 2월 : 대전산업대학교 전자
 공학과(공학사)
 1996년 3월~현재 : 한양대학교 대
 학원 전자통신공학과 석사과정

강 승 태



1971년 8월 17일생
1994년 2월 : 경북대 전자공학과(공학사)
1996년 2월 : 경북대 전자공학과 대학원(공학석사)
1996년 3월 ~ 현재 : 한양대 전자통신

공학과 대학원 박사과정 한양대 산업과학연구소 연구원
[주 관심분야] 전자기학 및 그 응용

김 형 동



1960년 10월 13일생
1984년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과 (학사)
1986년 2월 : 서울대학교 공과대학 전자공학과 (석사)
1992년 5월 : The University of

Texas at Austin (Ph. D.) 안테나 및 電波傳播, 마이크로파공학 전공

1989년 5월 ~ 1992년 5월 : Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin : Research Assistant

1992년 6월 ~ 1993년 1월 : Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin : Postdoctoral Fellow

1993년 3월 ~ 1996년 2월 : 한양대학교 전파공학과 전임강사

1996년 3월 ~ 현재 : 한양대학교 전파공학과 조교수