
5차 확장 삼각형 프랙털 안테나 설계 및 구현

최재연*

Design and Implementation of a Fifthly Expanded Triangular Fractal Antenna

Jae-yeon Choi*

요 약

삼각형 마이크로스트립 패치를 기본으로 프랙털 확장시킨 삼각형 프랙털 안테나(Triangular Fractal Antenna)를 제안한다. TFA의 기본모드와 고차모드에 대한 공진주파수를 스케일링 인자(scaling factor)를 변화시켜 조절한다. 스케일링 인자의 변화에 따라 공진주파수가 확산 혹은 집중되는 현상을 보인다. 각 프랙털 패치(fractal patch)에서 공진되는 주파수들은 대수 주기적으로 나타난다. 이 논문에서 제안된 삼각형 프랙털 안테나는 다중대역 특성을 갖는 시스템에 적용 가능하다.

ABSTRACT

The fractal expanded antenna with the configuration of a triangular microstrip patch antenna is presented and analyzed. In the fundamental and higher mode of TFA(Triangular Fractal Antenna), resonant frequencies are controlled by changing the scaling factor. It is observed that increasing scaling factor makes the resonant frequency be spread, and decreasing scaling factor makes it be concentrated. The scaling factor is varied as the expansion and concentration of resonant frequencies. The resonant frequency in each fractal patch element is observed log-periodically. The TFA can be applied to the multiband system.

키워드

삼각형프랙털안테나, 스케일링인자, 프랙털패치, 노치

1. 서론

광대역 또는 주파수 독립 복사 시스템을 설계하는데 있어서 중요한 문제점 중의 하나는 공진 주파수의 변화에 따라 시스템의 물리적 크기를 가변시켜야 한다는 점이다. 이러한 개념을 성공적으로 이용한 주파수 독립 안테나는 원뿔, 나선 그리고 대수주기 안테나이다 [1]-[3]. 이 안테나들은 어떠한 스케일 변환에서도 자신의 형태를 유지한다.

주파수 독립 특성을 나타내는 또 하나의 안테나는 프랙털 구조의 안테나이다. 프랙털 구조는 기하학적으로 자기유사성(self-similarity)을 갖고, 전기적으로

다중 대역 특성을 나타낸다[4]-[7]. 프랙털은 기존의 유클리디언 기하학으로 정의될 수 없는 형상을 묘사하기 위해 만델브로트(Mandelbrot)[8]에 의해 도입된 소수차원을 갖는 기하개념이다. 이 개념은 여러분야에 응용되었고 전자기학의 맥스웰 이론과 결합되어 프랙털 전자기 동역학[9]으로 발전하였다. 또한 안테나 배열이론과 결합하여 프랙털 안테나[10]로 발전하여 프랙털 전자기 동역학의 한 분야를 형성하였다.

프랙털 구조는 생성자(generator)라 불리는 초기구조를 다양한 스케일, 위치 및 방향으로 계속 반복시

* 남서울대학교

켜 자기유사 형태를 갖도록 구성된다. D. L. Jaggard 등은 각 프랙털 확장 단계에서의 기하학적 유사성이 전류분포, 복사패턴 등의 전자기적 현상에도 동일하게 적용됨을 보였다[9].

이 논문에서는 새로운 프랙털 구조를 갖는 마이크로스트립 패치 안테나를 제안하고 해석한다. 제안된 안테나는 삼각형 마이크로스트립 패치 안테나의 각 변에 크기가 대수적으로 감소하는 삼각형의 노치(notch)를 대수주기 간격으로 배치한 구조이다. 삼각형 노치 크기(notch scaling)의 변화에 따른 공진 주파수의 변화를 패치상의 전류분포를 이용하여 해석한다. 스케일링 인자의 변화에 대한 공진 주파수의 확산과 집중을 해석하고 각 프랙털 성분(fractal elements)의 연속적 공진으로, 안테나의 공진 주파수가 대수 주기적으로 발생함을 보인다. 다양한 스케일링 인자(scaling factor)에 대해 안테나를 설계하고 제작, 측정하여 특성을 확인한다.

II. 삼각형 프랙털 안테나의 구조 및 주파수 특성

프랙털이란 전체를 부분 부분으로 나누었을 때 부분 안에 전체의 모습을 갖는 무한확장에서 기하학적 도형으로 만델브로트에 의해 처음으로 제시되었다.

프랙털은 정수가 아닌 분수차원(fractional

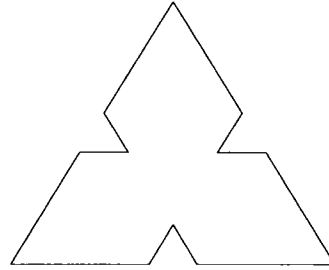
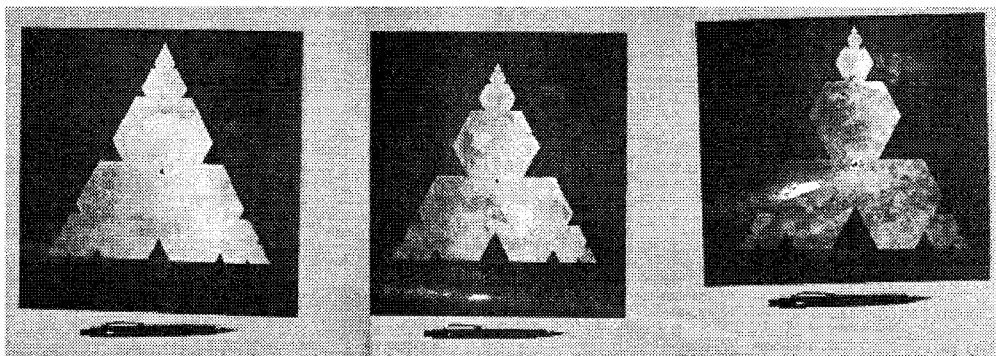


그림 1. 프랙털 확장을 위한 기본 구조
Fig. 1 Fundamental structure for fractal expansion

dimension)을 갖는다. 프랙털 구조의 가장 큰 특징은 자기 유사성(self-similarity)과 순환성(recursiveness) 그리고 축소에 대한 불변(independent of scale)이다. 즉 프랙털 도형은 생성자(generator)를 어떤 비율로 축소에 가면서 적당한 규칙에 따라 무한히 반복했을 때 얻어지는 것이므로 위와 같은 특징을 갖는다. 대표적인 예로 코흐(Koch) 곡선이 있는데 이것은 1.26 차원을 갖는다.

그림1은 프랙털 확장을 위한 기본구조를 나타낸 것이다.

이 형태는 삼각형 마이크로스트립 패치 안테나 각 변의 중앙에 변의 길이와 스케일링 인자를 곱한 값을 한 변의 길이로 하는 정삼각형의 노치를 배치하



(a) 0.1

(b) 0.15

(c) 0.2

그림 2. 5차 확장된 삼각형 프랙털 안테나
(스케일링 인자=0.1, 0.15, 0.2)
Fig. 2. The fifthly expanded TFA
(scaling factor=0.1, 0.15, 0.2)

여 구성한다. 여기서, 스케일링 인자는 노치의 한 변의 길이와 삼각형의 한변의 길이의 비이다.

그림2는 기본구조 안테나를 서로 120° 간격을 갖는 세 개의 썩기모양으로 나누어 각 부분을 각각의 방향으로 스케일링 인자에 따라 프랙털 확장한 것이다. 우선, 노치로부터 삼각패치 모서리 까지의 길이에 스케일링 인자를 곱한 값을 한변의 길이로 하는 노치를 노치와 삼각패치 모서리의 중앙에 놓는다. 나머지 방향에 대해서도 같은 방법을 반복한다.

그림2는 스케일링 인자가 각각 0.1, 0.15, 0.2일 때 5차 확장된 삼각형 프랙털 안테나를 나타낸 것이다. 그림에서 노치의 크기와 노치 사이의 간격은 대수 주기적으로 배열된다. 또한 각 방향으로 확장되는 패치의 크기도 자기유사 형태를 가지면서 대수 주기적으로 감소한다. 이러한 패치와 노치의 자기유사성과 대수 주기적 배열은 전류분포와 공진주파수 등의 전기적 특성에서도 동일하게 나타난다.

스케일링 인자가 증가함에 따라 각 썩기 방향으로 자기유사 형태를 가지면서 프랙털 전개되는 패치 크기의 감소율은 증가한다. 따라서, 스케일링 인자의 증가와 감소는 각각 스펙트럼 상에서 공진주파수의 확산과 집중현상을 발생시킨다. 이러한 주파수의 확산과 감소의 정도를 나타내기 위해 각 패치에 반파장의 기본모드가 형성되는 주파수를 지표주파수(f_1, f_2, \dots, f_n)로 택한다. 이 경우, 지표주파수는 각 프랙털 확장 패치의 기본주파수를 나타낸다. 프랙털 확장시 패치의 크기가 대수적으로 감소하기 때문에 이러한 지표주파수들도 대수 주기적으로 나타난다. 또한 스케일링 인자가 증가함에 따라 인접 지표주파수 간의 대수 주기($\delta = f_{n+1}/f_n$)가 증가하는데, 이는 주파수 스펙트럼 상에서 공진주파수의 확산으로 나타난다.

III. 시뮬레이션 결과

5차 확장된 프랙털 안테나를 스케일링 인자를 변화시켜 설계하고 제작한다. 설계된 안테나는 앙상블(Ensemble) 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한다. 급전위치는 첫 번째 공진주파수에서 반파장 기본모드가 나타나는 전류분포를 보면서 찾아낸다. 다음은 안

테나의 설계 데이터이다.

$$\text{TFA의 한 변의 직선길이} = 200 \text{ mm}$$

$$\epsilon_r = 2.5$$

$$h = 1.575 \text{ mm}$$

$$\text{스케일링 인자(scaling factor)} = 0.1, 0.15, 0.2$$

안테나의 반사손실은 HP-8510C 네트워크 에너지(network analyzer)를 이용하여 측정한다. 그림3은 스케일링 인자가 0.1일 때 반사손실을 나타낸 것이다. 그림3에 표시한 주파수들은 각 프랙털 패치에 반파장 모드가 존재할 때의 지표주파수들을 나타낸 것이다. 그림3에서 표시되지 않은 주파수들은 각각의 공진주파수에서 나타나는 고차모드로서 이 주파수들도 대수 주기적으로 나타난다. 그러나 공진주파수에 대한 고차모드들을 전류분포로 찾기가 힘들어 반파장 기본모드가 존재하는 주파수들을 지표주파수로 선택한다. 시뮬레이션을 통해 각각의 공진주파수에서 반파장을 형성하는 전류분포를 나타낸다. 그림4는 첫 번째 지표주파수(f_1)에서의 전류분포를 나타낸 것이다.

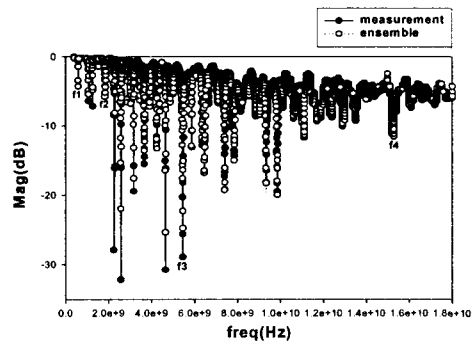


그림 3. 스케일링 인자가 0.1일 때 반사손실
Fig. 3 Return loss(scaling factor=0.1)

그림5는 두 번째 프랙털 패치가 턴온(turn on)되는 지표주파수(f_2)에서의 전류분포를 나타낸 것이다. 그림6은 세 번째 프랙털 패치에 반파장 공진모드가 존재할 때의 전류분포를 보인 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 각 지표주파수에서의 전류분포는 자기유사성을 나타낸다.

스케일링 인자가 0.15, 0.2일 때도 동일한 전류분포

를 갖는다. 그림7은 스케일링 인자가 0.15일 때 반사 손실을 나타낸 것이다. 그림8은 스케일링 인자가 0.2 일 때 반사 손실을 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 스케일링 인자의 변화에 따라 공진 주파수들이 확산 혹은 집중되는 현상을 볼 수 있다. 또한 모든 경우에서 지표주파수들이 대수 주기적으로 나타남을 확인할 수 있다.

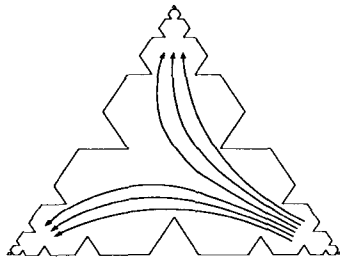


그림 4. 첫 번째 지표주파수의 전류분포
Fig. 4 Current distribution of the first index frequency

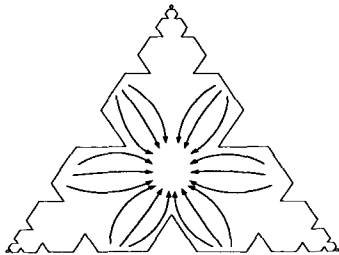


그림 5. 두 번째 지표주파수의 전류분포
Fig. 5 Current distribution of the second index frequency

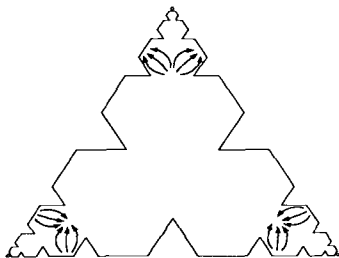


그림 6. 세 번째 지표주파수의 전류분포
Fig. 6 Current distribution of the third index frequency

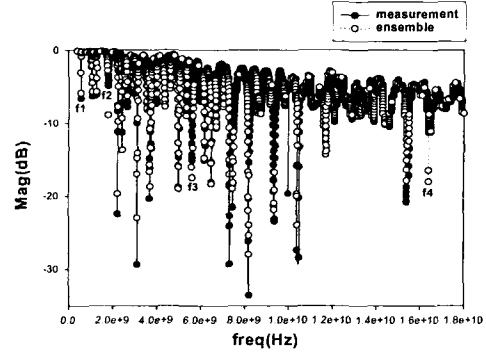


그림 7. 스케일링 인자가 0.15일 때 반사손실
Fig. 7 Return loss (scaling factor=0.15)

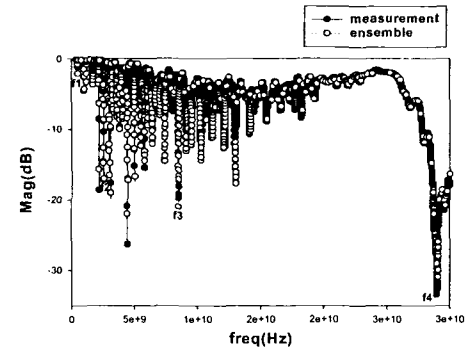


그림 8. 스케일링 인자가 0.2일 때 반사손실
Fig. 8 Return loss (scaling factor=0.2)

스케일링 인자에 따른 지표주파수와 인접 지표주파수간의 비를 각각 표1과 표2에 나타낸다. 스케일링 인자가 0.2일 때의 f_5 는 계측기의 측정 범위를 넘어 측정하지 못하였으나 인접주파수간 대수주기를 고려하면 약 98.6GHz에서 나타날 것으로 예측된다. f_1 은 스케일링 인자가 증가하면 감소한다. 이는 노치의 크기가 증가하면서 반파장에 대한 길이가 길어지기 때문이다. 스케일링 인자가 0.1, 0.15, 0.2로 증가함에 따라 지표주파수간 대수 주기도 $\delta \approx 2.8, 2.9, 3.4$ 로 증가함을 알 수 있다. 이는 스케일링 인자가 증가함에 따라 각 썰기 방향으로 자기유사 형태를 가지면서 프랙털 전개되는 패치 크기의 감소율이 증가하기 때문이다.

표 3. 스케일링 인자의 변화에 따른 지표주파수
Table 1. Index frequency with the change of the scaling factor

() : 시뮬레이션 값

| 스케일링 인자 \ 주파수(GHz) | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
|--------------------|------------------|-------------------|------------------|
| f1 | 0.592 (0.596) | 0.56 (0.55) | 0.517 (0.52) |
| f2 | 1.845 (1.83) | 1.793 (1.80) | 2.54 (2.56) |
| f3 | 5.434 (5.45) | 5.605 (5.59) | 8.47 (8.487) |
| f4 | 15.217 (15.4) | 16.437 (16.38) | 29.02 (29.13) |
| f5 | 42.36 | 47.54 | - |

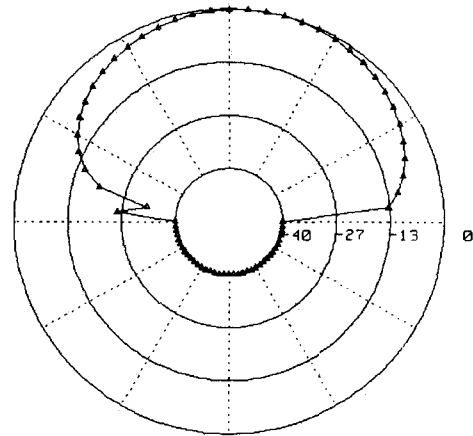
표 2. 스케일링 인자의 변화에 따른 인접 지표주파수비
Table 2. Adjacent index frequency ratio with the change of the scaling factor

() : 시뮬레이션 값

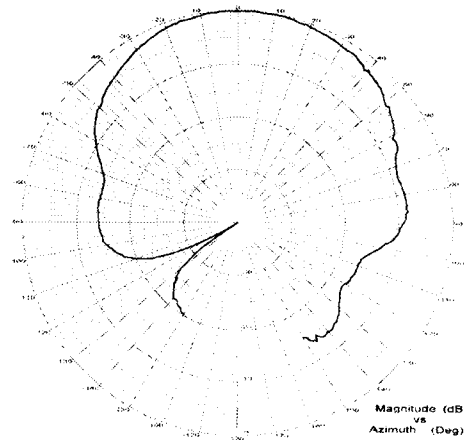
| 스케일링 인자 \ 주파수비 | 0.1 | 0.15 | 0.2 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| f2/f1 | 3.117 (3.07) | 3.2 (3.273) | 4.913 (4.923) |
| f3/f2 | 2.945 (2.978) | 3.126 (3.106) | 3.335 (3.315) |
| f4/f3 | 2.80 (2.826) | 2.933 (2.93) | 3.426 (3.432) |
| f5/f4 | 2.784 | 2.89 | - |

안테나의 복사패턴은 Flam & Russel사의 FR-959 원거리 안테나 측정 시스템에 의해 측정한다. 그림9는 스케일링 인자가 0.1일 때 첫 번째 지표주파수에서의 복사패턴을 나타낸 것이다. 이 경우의 복사패턴은 노치가 없는 단순한 삼각형 마이크로스트립 패치 안테나의 기본모드에 대한 복사패턴과 매우 유사함을 알 수 있다. 그리고 접지면 크기가 유한하기 때문에 복사패턴은 대칭이 되지 않는다. 그림10, 그림11, 그림12는 각각 두 번째, 세 번째, 네 번째 지표주파수(f_2, f_3, f_4)에서의 복사패턴을 나타낸 것이다. 지표주파수가 증가함에 따라 복사 패치 표면에서 전류 밀도의 분포가 복잡해져 부엽(side lobe)과 널(null)의 수가 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 급전구조를 바

꾸거나 프랙털 안테나의 배열을 통해 개선할 수 있다. 그림 13은 첫 번째 지표주파수에서의 동일편파(co-polarization)와 교차편파(cross-polarization)를 나타낸 것으로 약 15dB의 차가 난다. 두 번째 지표주파수에서는 약 10dB~15dB의 차가 나고, 세 번째, 네 번째 지표주파수로 올라갈수록 편파특성이 나빠진다.



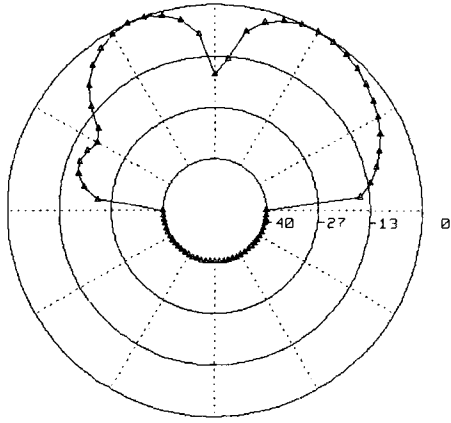
(a)



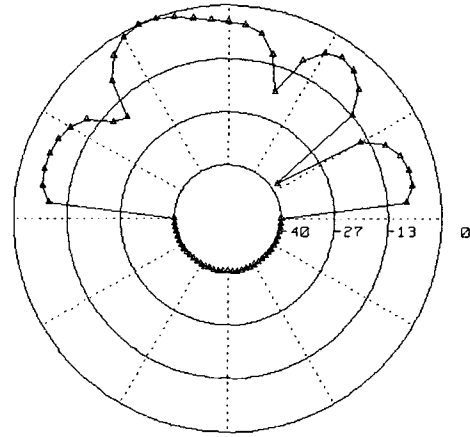
(b)

그림 9. 첫 번째 지표주파수의 복사패턴
(a) 앙상블 (b) 측정

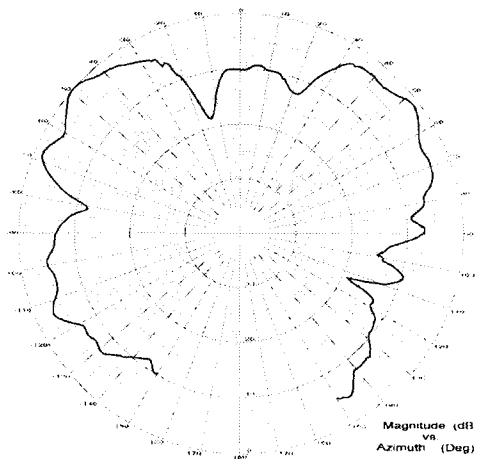
Fig. 9. Radiation pattern of the first index frequency
(a) ensemble (b) measurement



(a)

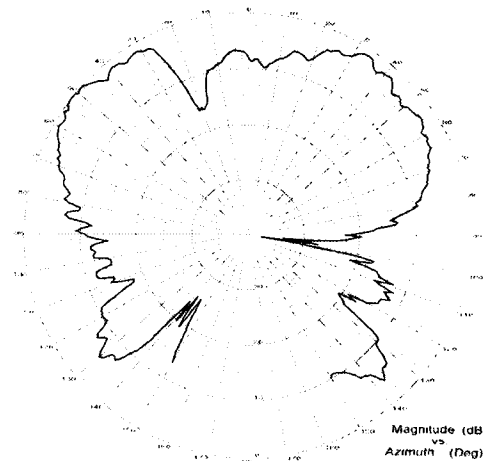


(a)



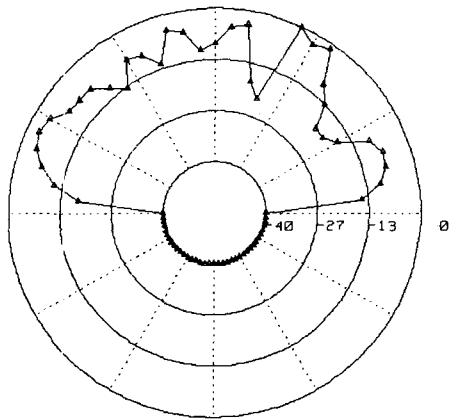
(b)

그림 10. 두 번째 지표주파수의 복사패턴
 (a) 앙상블 (b) 측정
 Fig. 10. Radiation pattern of the second index frequency
 (a) ensemble (b) measurement

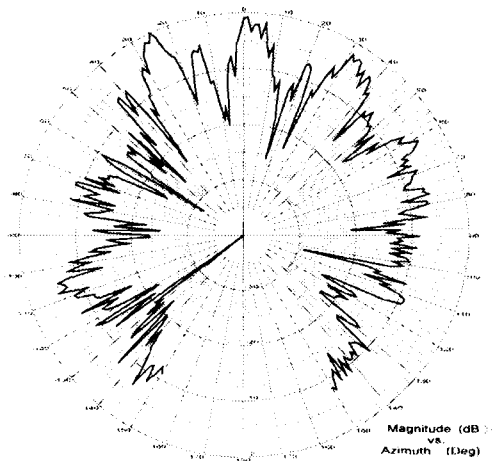


(b)

그림 11. 세 번째 지표주파수의 복사패턴
 (a) 앙상블 (b) 측정
 Fig. 11. Radiation pattern of the third index frequency
 (a) ensemble (b) measurement



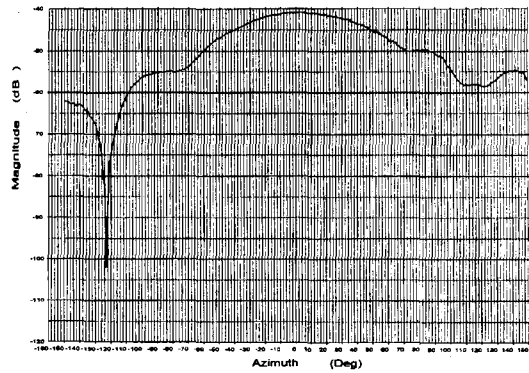
(a)



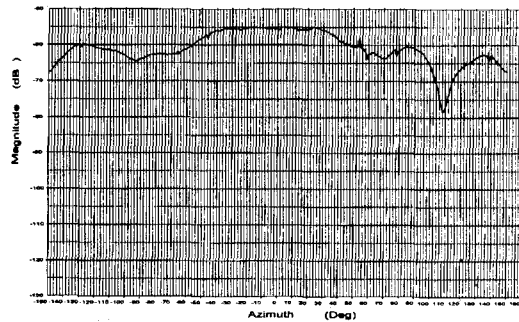
(b)

그림 12. 네 번째 지표주파수의 복사패턴
(a) 앙상블 (b) 측정

Fig. 12. Radiation pattern of the fourth index frequency
(a) ensemble (b) measurement



(a)



(b)

그림 13. 첫 번째 지표주파수의 동일편파와 교차편파

(a) 동일편파 (b) 교차편파

Fig. 13. Co-polarization and cross-polarization in the first index frequency

(a) co-polarization (b) cross-polarization

IV. 결론

삼각형 마이크로스트립 패치를 기본구조 프랙털 확장시킨 삼각형 프랙털 안테나를 제안하고 해석하였다. 각 프랙털 확장 단계에서 발생하는 패치상에 반파장 모드가 존재하도록 지표 주파수를 택하여 공진 주파수의 확산 또는 집중의 정도를 측정하였다.

프랙털 확장에서 스케일링 인자의 변화에 따라 안테나의 공진 주파수가 확산 또는 집중됨을 보였다. 즉, 스케일링 인자를 증가시키면 공진 주파수가 확산되고, 인자를 감소시킬 때 공진 주파수가 집중되었다. 또한, 지표주파수들이 스케일링 인자에 의해 결

정되는 일정한 대수주기 간격으로 나타남을 보였다. 그러나 대역폭이 협소하고 높은 주파수에서 고차모드로 인해 복사패턴의 특성이 좋지 않아 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] G. A. Deschamps and J. D. Dyson, "The logarithmic spiral in a single aperture multimode antenna system," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 19, pp. 90-96, 1971.
- [2] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, John Wiley, New York, 1981.
- [3] R. C. Johnson and H. Jasik, *Antenna Engineering Handbook*, chap. 14-4, pp. 14.32-14.37, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [4] D. H. Werner and P. L. Werner, "Frequency independent features of self-similar fractal antenna," *Radio Science*, vol. 31, no. 6, pp. 1331-1343, 1996.
- [5] C. Puente and R. Pous, "Fractal design of multiband and low side-lobe arrays," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 44, no. 5, pp. 730-739, 1996.
- [6] C. Puente, J. Romeu, R. Pous and A. Cardama "On the behavior of the sierpinski multiband fractal antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, no. 4, pp. 517-524, 1998.
- [7] C. Puente, J. Romeu, R. Pous, X. Garcia and F. Benitez, "Fractal multiband antenna based on the sierpinski gasket," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1-2, 1996.
- [8] B. B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, San Francisco, CA: W.H.Free-man, 1983.
- [9] D. L. Jaggard, On fractal electrodynamics, in recent advances in electromagnetic theory, edited by H. N. Kritikos and D. L. Jaggard, pp. 183-224, Springer-Verlag, New York, 1990.
- [10] N. Cohen, "Fractal antennas : Pt. 2," *Communicat. Quart.*, pp. 53-66, Summer, 1996.

저 자 소 개



최재연(Jae-yeon Choi)

1985년 한양대학교 전자통신공학과(학사)

1987년 한양대학교 대학원 전자통신공학과(석사)

1998년 한양대학교 대학원 전자통신공학과(박사)

1987년~1989년 삼성종합기술원

1989년~1992년 LG 정보통신(주) 연구소

1996년~현재 남서울대학교 전자정보통신공학부 조교수