

파라볼릭 반사기 체적 축소용 프린트 리플렉터어레이 안테나 설계

문상만*, 김인규**

Printed Reflectarray Antenna Design for Parabolic Reflector Volume Reduction

Sang-Man Moon*, In-Kyu Kim**

Abstract

In this study, we discuss about the printed reflectarray antenna design for parabolic reflector volume reduction. For this, we simulated and measured the phase characteristics of the unit array element of reflectarray antenna using waveguide simulator. As a results, the maximum phase variation is 298° by simulation, the average phase variation is 309° by measurement in 10GHz. And the printed Reflectarray antenna gain is 28.3dBi, 3dB beamwidth is E-plane 5.1° , H-plane 5.2° , sidelobe level is E-plane -11.4dB, H-plane -17.6dB.

초 록

본 연구는 파라볼릭 반사기의 체적을 줄일 수 있는 프린트 리플렉터어레이 안테나 설계에 대한 연구이다. 이를 위해 시뮬레이션과 제작된 도파관 시뮬레이터 측정을 통해 리플렉터어레이 안테나 단일소자의 위상변위 특성을 확인하였다. 그 결과, 10GHz에서 시뮬레이션시 최대 298° 의 위상 변위를 나타내었으며, 제작 측정시 309° 의 평균 위상변위 특성이 나타남을 확인하였다. 또한, 프린트 리플렉터어레이 안테나 이득은 28.3dBi, 3dB 빔폭은 E-plane 5.1° , H-plane 5.2° , 부엽은 E-plane -11.4dB, H-plane -17.6dB를 나타내었다.

키워드 : 리플렉터어레이(reflectarray), 안테나(antenna), 도파관(waveguide), 시뮬레이터(simulator)

1. 서 론

미래 행성 탐사용 고이득 통신용 안테나, 우주 에너지 전력 무선전송용 우주급 대형 안테나로 개발되고 있는 Inflatable 안테나의 설계 기초 개념은 파라볼릭 안테나와 이를 경량화 및 개선한

리플렉터어레이 안테나로부터 시작된다. 1960년대 리플렉터어레이가 처음 소개된 때에는 파라볼릭 안테나의 반사면을 평면으로 구성하고 구형 도파관의 깊이 변화를 이용한 도파관 위상 변위 반사판 배열 안테나 이었으나, 1980-90년대에는 마이크로스트립 안테나 기술의 발달로 리플렉트

접수일(2013년 9월 5일), 수정일(1차 2013년 10월 17일), 게재 확정일(2013년 11월 1일)

* 융합기술연구팀/msm@kari.re.kr

** 융합기술연구팀/timber@kari.re.kr

어레이 안테나의 반사면이 평면이면서, 경량 안테나로 개발되었고, 이는 파라볼릭 안테나의 반사기의 체적을 줄이는 방법에 활용되기도 하였다. 또한, 다양한 마이크로스트립 기판이 생산되면서 그 활용 목적에 따라 선택의 폭도 매우 다양해졌고, 마이크로스트립 기판의 고유 특성들을 이용하여, 대역폭 증가, 이중 대역 안테나 등 다양한 기술이 접목되는 결과를 가져왔다. 최근 LCP (Liquid Crystal Polymer) 기판의 생산은 더욱 경량화되고, 유연성 있는 형태의 반사판 제작이 가능해짐에 따라, 이를 활용한 리플렉터어레이 안테나 개발이 이루어지고 있다. 특히, 1999년도에는 Inflatable 리플렉터어레이 안테나가 제안되고, 2011년도에는 위상 변위기 내장 능동형 리플렉터어레이 안테나가 제안되었으며, 이후, MEMS 기술 등을 활용한 더욱 다양한 안테나가 개발되고 있는 추세이다.[1][2]

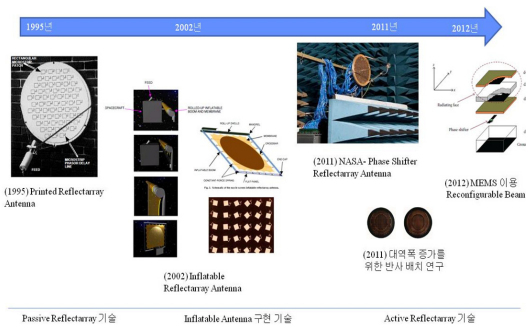


그림 1. 리플렉터어레이 안테나 개발 추세

따라서 본 연구에서는 이러한 개발 추세에 맞추어 파라볼릭 안테나 반사기 보다 체적이 적은 안테나인 프린트 리플렉터어레이 안테나의 설계 기술에 대해 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 프린트 리플렉터어레이 안테나 개요

본 절에서는 프린트 리플렉터어레이 안테나에 대한 구조 및 설계 방법에 대해 설명하고자 한다.

2.1.1 안테나 기본 구조

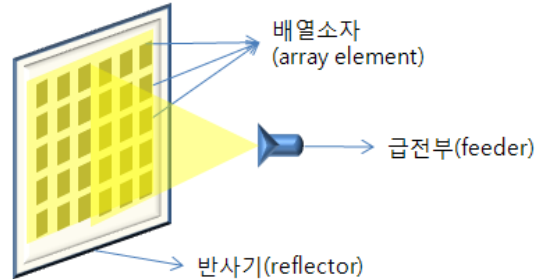


그림 2 리플렉터어레이 안테나 구조

프린트 리플렉터어레이 안테나는 일반적으로 잘 알려진 파라볼릭 안테나의 구성요소와 동일하게 급전부(feeder)와 반사기(reflector)로 구성되어 있는데, 파라볼릭과 다른 점은 반사기가 평면형이며, 반사면에는 위상 조절을 위한 배열소자(array element)가 배치되어 있다는 점이다. 이러한 구조는 일반적으로 곡면형태의 반사면인 파라볼릭 안테나를 위성이나 발사체에 장착하여 발사하는 것보다는 평면형으로 된 형태의 안테나를 우주에서 전개하여 사용하는 것이 보다 체적을 줄일 수 있어 보다 비용 효율적인 방법으로 각광받고 있다.

2.1.2 안테나 설계 방법

프린트 리플렉터어레이 안테나는 일반적인 파라볼릭 안테나와 동일한 설계 절차를 갖는다. 안테나 요구사항에 따라, 먼저 급전부를 설계(일반적으로 10dB Taper)하고, 다음으로 반사면을 통해 동 위상 평면파를 만들기 위한 반사기를 설계한다. 다만, 파라볼릭 반사면에서 요구되는 F/D 비율에 따른 파라볼릭 반사기 대신 평면 프린트 반사기에서의 목적하는 빔 방향에 조향하기 위해 위상 값 보상용 배열소자를 배치하면 된다. 이때 배열소자는 급전부로부터 입사되는 파에 따라 반사특성이 달라지는데, 이에 대한 위상 정보를 이용하여 각 위상에 맞는 배열소자의 위치별 설계값을 소자의 배치시 활용하면 된다.

2.2 배열 소자 설계

본 절에서는 프린트 리플렉터어레이 안테나의 핵심기술인 배열소자 설계에 대해 소개하고자 한다.

2.2.1 배열소자 설계 개념

리플렉터어레이 안테나 반사기의 배열소자 설계를 위해서는 배열소자의 단위배열에 대한 소자 특성을 파악해야 한다. 반사면에 위치한 많은 수의 배열소자는 주기적인 배치로 되어 있다. 이러한 배열소자의 대표로써 한쌍(두개의 무급전 패치)의 단위 배열 소자를 생각할 수 있는데, 그림 3과 같이 이 단위배열소자는 급전부의 입사파로부터 전계가 입사되면, 전자기학적으로 좌우 단위배열소자는 한 파장단위의 Magnetic wall(보라색)로 표현될 수 있고, 상하의 배열소자는 반파장 단위의 Electric Wall(녹색선)로 표현 할 수 있다. 이는 시뮬레이션에서 간략화된 배열 소자의 특성 확인에 활용되는 방법이다.[1][2]

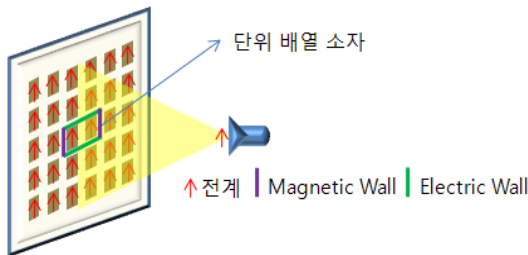


그림 3 Electric / Magnetic Wall 개념

그림 4는 단위배열 소자를 보여준다. 단위배열 소자는 입사파가 수직 편파(y축)일 때, 단위배열은 λ_0 (가로) \times $\lambda_0/2$ (세로)로 마이크로스트립 기판에 대칭의 위상변위 무급전 패치가 된다. 두 패치 사이의 간격은 안테나 설계시 부엽레벨을 고려하여 일반적으로 $\lambda_0/2 \sim \lambda_0$ 사이에서 선정된다. 무급전 패치는 위상변위를 위해 가변적인 크기로 되는데, 수직 편파의 경우, 주파수는 세로(y축) 길이, 위상변위 값은 가로(x축) 폭에 따른 임피던스에 따라 정해지게 된다.[4][5]

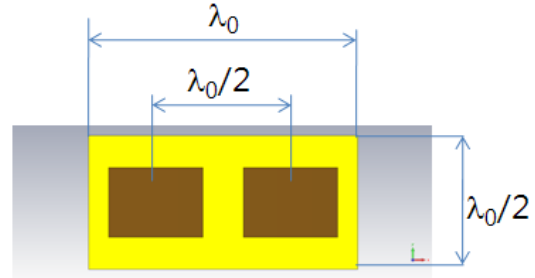


그림 4 단위 배열 소자 설계

2.2.2 단위배열소자 특성

그림 4의 단위배열소자를 활용하여 패치폭 변화에 따른 배열소자의 위상변화 특성을 확인해야 하는데, 본 연구에서는 이를 위해 도파관 시뮬레이터(이하 WGS로 명명)를 이용하였다. 이 WGS의 입력단을 설계 주파수의 표준 도파관으로 설계하였다. 이는 변화 특성에 대한 범용적인 결과 값을 얻기 위함이다.

본 연구에서는 10GHz 대역의 안테나를 설계함을 목적으로 설정하였고, 이에 따라 설계 주파수를 포함하는 표준형 구형 도파관인 WR-90을 입력단으로 선정하였다. 이 도파관 입력단으로부터 도파관내 전자기파를 여기시켜 단위배열소자에 인가하기 위해 원활한 전자기파가 인가되도록 WR-90 출력단을 확장하고 끝단에 단위배열소자 마이크로스트립 패치를 위치시켰다.

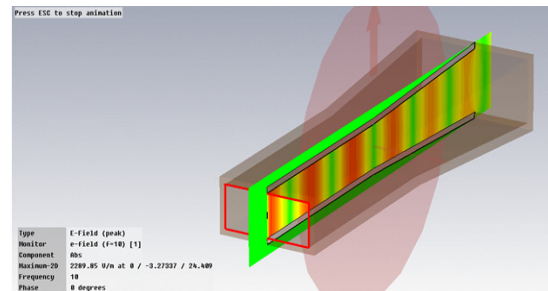


그림 5 WGS 전자기 특성(시뮬레이션)

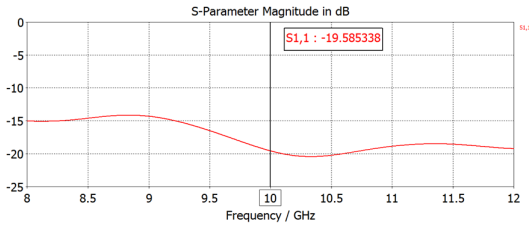


그림 6 WGS WGS 매칭 특성(시뮬레이션)

그림 5는 CST사의 MWS를 활용하여, WGS의 전자기 특성에 대한 시뮬레이션 결과로 도파관내 전계를 보여주며, 인가된 전자기파가 주기적 형태로 잘 분포됨을 알 수 있어, 확장 개구면까지 원활히 전자기파가 전달됨을 알 수 있었다. 그림 6은 설계주파수인 10GHz에서 S11이 -19.5dB로 반사가 거의 없는 것으로 설계되었음을 알 수 있다.



그림 7 제작된 WGS

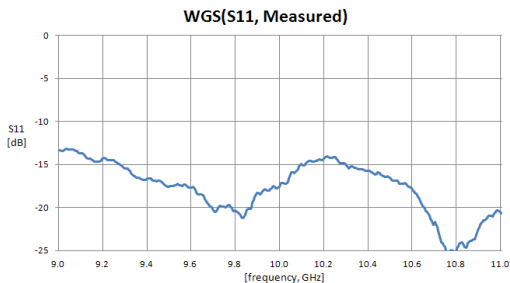


그림 8 제작된 WGS 매칭 특성(측정)

시뮬레이션 결과를 바탕으로 그림 7과 같이 WGS를 제작하였으며, 제작 결과, 그림 8과 같이

제작된 WGS S11은 -17.3dB로 시뮬레이션과 동일한 특성을 나타냄을 확인 할 수 있었다.[6][7]

다음으로 먼저 그림 5의 WGS를 이용하여, 시뮬레이션을 통해 단위배열소자의 위상특성을 확인하였다.

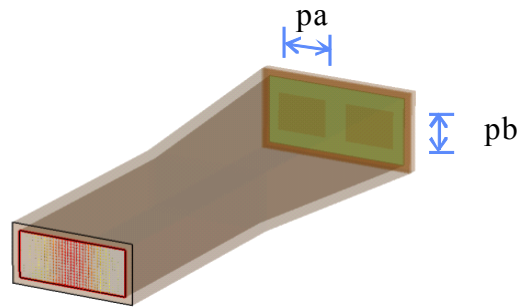
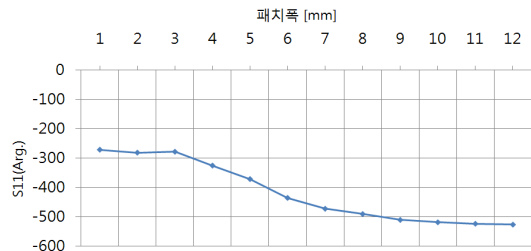
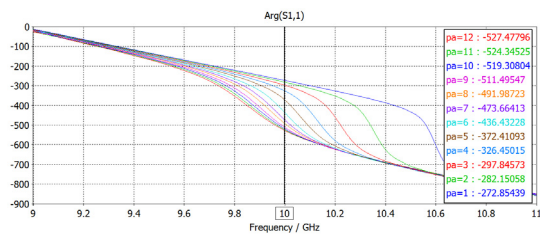


그림 9 위상 측정용 WGS(시뮬레이션용)



(a) 패치폭(pa) 변화에 따른 위상 특성@10GHz (시뮬레이션)



(b) 주파수 영역 위상 변위 특성

그림 10 단위 배열 소자 위상특성(시뮬레이션)

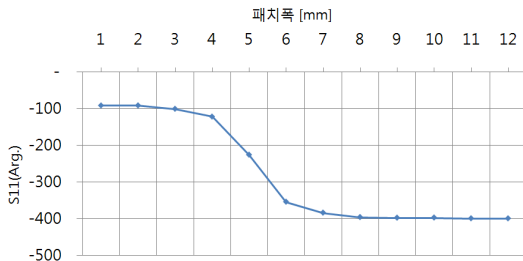
그림 9에서 적용된 단위배열소자의 마이크로 스트립 기판은 비유전율 2.94, 두께 0.508mm Epoxi (RT Duroid 6202)기판으로 하였으며, 패치소자의 크기 pb는 8.5mm로 고정, pa는 1~12mm 까지 가변하면서 그 때의 위상값을 변수 변화로

확인 하였다. pb는 설계주파수 변수로써 잘 알려진 마이크로스트립 안테나의 설계수식에 따라 유효 비유전율 및 기관 높이를 고려한 수식을 이용하여 구할 수 있었다. 그 결과, 그림 10에서 보듯이 설계 주파수 10GHz에서 1~9mm 소자 사이에서 298°의 최대 위상 변위가 가능함을 확인 하였다.[6][7]

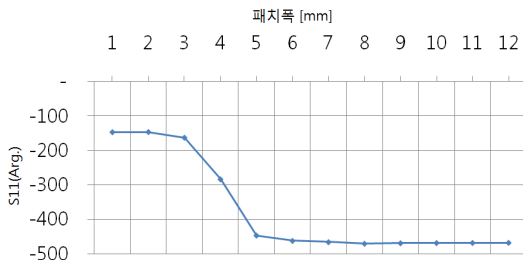


그림 11 측정 및 제작샘플

그림 11은 단위배열소자 제작측정 환경이다. 12종의 샘플을 제작하였으며, 12 종의 샘플은 각각 8개씩 제작하여, 제작 측정 평균값으로 결과값을 정리 하였다.



(a) 10GHz



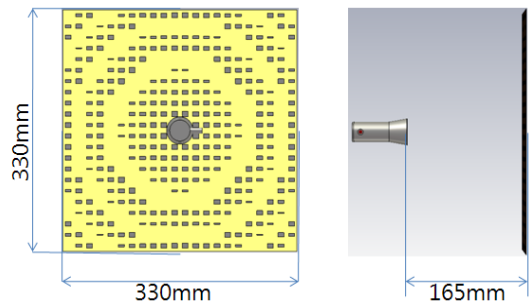
(b) 10.2GHz

그림 12 pb별 최대(평균) 위상변위(측정)

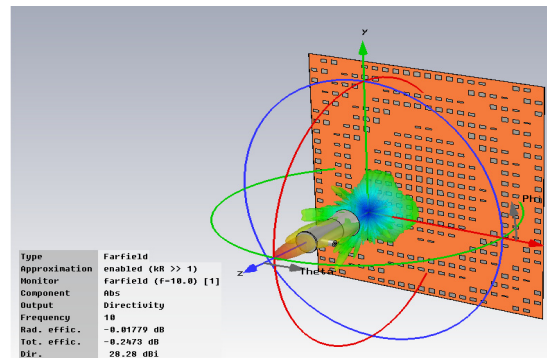
그 결과, 그림 12(a)의 10GHz와 같이 샘플의 위상변위는 최대값으로 폭 1mm에서 9mm 사이에서 309°의 위상변위가 가능함을 확인 할 수 있어, 시뮬레이션 값과 거의 동등함을 확인 할 수 있었다. 또한, 샘플사이의 위상변위차가 크긴 하지만, 그림 12(b)의 10.2GHz에서는 최대 327°의 위상변위가 가능함도 확인 하였다.[7] 완전한 위상변위를 만족하기 위해서는 360°를 만족하는 단위배열 소자가 되어야 하지만, 반사면에 위치하는 배열소자 역시 반파장 단위로 배치되므로 어느 정도의 위상오차는 나타나게 되어 있다. 이는 보상하지 못하는 위상오차로 인해 부엽이 높아질 것으로도 예상된다.

2.3 프린트 리플렉터레이 안테나 설계

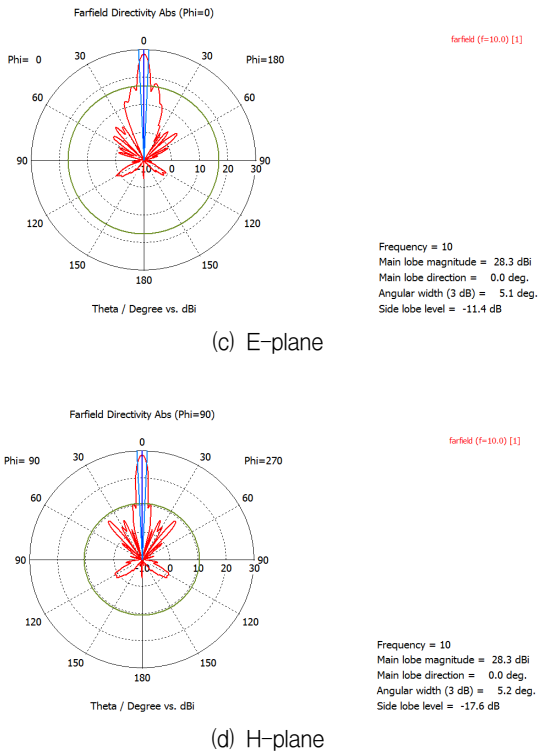
그림 12의 결과를 이용하여, 그림 13과 같이 프린트 리플렉터레이 안테나를 설계하였다.



(a) 설계 안테나(좌:정면도, 우:측면도)



(b) 3D 방사패턴



(c) E-plane

(d) H-plane

그림 13. 프린트 리플렉터레이 안테나 특성 (시뮬레이션)

표 1. 배열소자 거리차에 따른 패치폭 설계 (1사분면)

배열소자 거리차에 따른 패치폭 설계 [mm]											
간격 [mm]	7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5	97.5	112.5	127.5	142.5	157.5
7.5	8.30	7.27	6.25	5.49	4.56	2.35	0.33	6.16	4.51	0.90	6.63
22.5	7.27	6.73	6.00	5.25	4.33	1.26	-	5.93	4.32	0.74	6.28
37.5	6.25	6.00	5.49	4.78	3.56	0.88	-	5.52	3.67	0.42	5.90
52.5	5.49	5.25	4.78	3.96	1.26	0.33	6.47	4.91	1.94	-	5.35
67.5	4.56	4.33	3.56	1.26	0.52	7.44	5.52	3.98	0.74	6.63	4.66
82.5	2.35	1.26	0.88	0.33	7.44	5.73	4.51	1.22	-	5.54	3.43
97.5	0.33	-	-	6.47	5.52	4.51	1.94	-	6.09	4.48	0.91
112.5	6.16	5.93	5.52	4.91	3.98	1.22	-	6.28	4.83	1.57	-
127.5	4.51	4.32	3.67	1.94	0.74	-	6.09	4.83	2.45	-	5.87
142.5	0.90	0.74	0.42	-	6.63	5.54	4.48	1.57	-	6.05	4.47
157.5	6.63	6.28	5.90	5.35	4.66	3.43	0.91	-	5.87	4.47	1.05

반사면의 크기는 $330(11\lambda_0) \times 330(11\lambda_0)$ mm 이고, 급전혼간의 간격은 165mm(F/D = 1.0) 이다. 이때, 배열소자는 $0.5\lambda_0$ 로 모두 484(22×22)개의 소자로 구성된다. 배열된 소자 폭(1사분면)의 설계값을 표 1에 나타내었다. 2,3,4분면은 1분면과

대칭적인 구조를 갖는다. 또한, 급전혼은 10.7 dBi 이득의 10dB 빔폭이 $\pm 55^\circ$ (E/H 동일)인 안테나를 사용하였다.

시뮬레이션 결과, 프린트 리플렉터레이 안테나는 이득 28.3dBi, 3dB 빔폭 E-plane 5.1° , H-plane 5.2° , 부엽 E-plane -11.4dB, H-plane -17.6dB를 나타내었다. 이득은 일반적인 파라볼릭 안테나의 고효율 안테나보다 약 1dB 정도 다소 낮는데, 이는 단위 배열 반사기 배열시 무급전 패치가 완전한 360° 위상 변화를 만족하지 못한 결과로 효율이 낮은 것이 원인으로 보이며, 이는 다소 높은 부엽이 나타나는 결과를 가져오게 되었다. 하지만, 비교적 실제 직경(d) $11\lambda_0$ 의 파라볼릭 안테나의 이론적 이득($\frac{\pi^2 d^2}{\lambda^2} e_A = 29.2$ dBi, 효율 $e_A = 0.7$ 일 때) 및 빔폭($70\lambda/d = 6.3^\circ$)과도 동등 수준의 값을 나타낸다.

3. 결 론

본 연구는 파라볼릭 반사기의 체적을 줄일 수 있는 프린트 리플렉터레이 안테나 설계에 대한 연구이다. 이를 위해 설계주파수 10GHz에서 표준형 도파관 WR-90 입력을 갖는 WGS를 활용하여 단위배열소자의 위상변위량 값을 도출하였다. 또한, 이를 이용하여, 반사면의 크기 $330(11\lambda_0) \times 330(11\lambda_0)$ mm 리플렉터레이 안테나 반사기를 설계하였다. 반사기는 모두 484(22×22)개의 소자로 구성되었으며, 급전혼은 이득 10.7 dBi, 10dB 빔폭 $\pm 55^\circ$ (E/H 동일)인 안테나를 사용하였다.

단위 배열 소자의 위상 변위 결과를 활용하여, 프린트 리플렉터레이 안테나를 설계하였으며, 시뮬레이션 결과, 이득 28.3dBi, 3dB 빔폭 E-plane 5.1° , H-plane 5.2° , 부엽 E-plane -11.4dB, H-plane -17.6dB를 나타내었다.

향후, 본 설계 방법을 이용하면, 다른 대역의 프린트 리플렉터레이 안테나의 반사기 설계에 충분히 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Pozar, D. M., S. D. Targonski, and H. D. Syrigos, "Design of Millimeter Wave Microstrip Reflectarrays," IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 45, No. 2, 287-296, Feb. 1997.
2. John Huang, Jose A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, IEEE Antennas and Propagation Society, 2008
3. Jason Stockmann, Richard Hodges, "The Use of Waveguide Simulators to Measure the Resonant Frequency of Ku-band Microstrip Arrays", APSIS 2005 IEEE, July 2005, pp. 417-420
4. K. H. Sayidmarie, "Phasing of a Microstrip Reflectarray Using Multi-Dimensional Scaling of its Elements", Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 2, 125 - 136, 2008
5. Sabine Dieter, "High-Resolution Probes for Near-Field Measurements of Reflectarray Antennas", IEEE ANTENNAS AND WIRELESS PROPAGATION LETTERS, VOL. 8, 2009
6. 문상만, 김인규, "도파관 시뮬레이터를 활용한 대형우주물체용 X-대역 프린트형 리플렉터어레이 안테나 쿠폰 설계", 2013.4.26, 2013 한국우주과학회 춘계학술대회
7. 문상만, 김인규, "프린트형 Reflectarray 안테나 배열 소자용 구형 도파관 Waveguide Simulator 설계 검증", 2013.8.23, 2013 한국전자과학회 하계학술대회