

Folded Reflectarray를 이용한 고이득 94 GHz 모노펄스 안테나 High-Gain 94 GHz Monopulse Antenna Using Folded Reflectarray

이한승 · 채희덕 · 전종훈* · 남상욱

Hanseung Lee · Heeduck Chae · Jonghoon Chun* · Sangwook Nam

요 약

본 논문은 94 GHz를 중심 주파수로 하며, 모노펄스 형식의 추적 레이더 시스템에 사용되는 folded reflectarray 안테나를 제안한다. 추적 레이더는 대부분 목표물로부터 반사되어 돌아온 반사 신호들을 비교하여 목표물을 찾으며, 모노펄스 형식에서는 이러한 신호들의 비교를 동시에 수행한다. 본 논문에서 제안한 모노펄스 형식의 folded reflectarray 안테나는 polarizing grid, reflectarray, 다중 모드 feed horn, 그리고 도파관으로 제작된 comparator로 이루어져 있다. 제작된 안테나는 다중 모드 feed horn과 comparator의 모노펄스 급전부에 의해 sum 모드, azimuth 모드, 그리고 elevation 모드, 이렇게 세 개의 방사 패턴 형식을 나타낼 수 있다. 측정 결과, sum 패턴에서는 36 dB, azimuth 패턴에서는 33.5 dB, 그리고 elevation 패턴에서는 27.2 dB의 이득을 확인할 수 있었다.

Abstract

This paper proposes a high-gain monopulse antenna using the folded reflectarray for a monopulse target-tracking radar systems designed at the center frequency of 94 GHz. In target-tracking radar systems, the angle of arrival of the incoming wave is determined by comparing the signal received on two or more non-coincident antenna patterns. This is the physical basis of most target-tracking techniques and the comparison is made simultaneously in a monopulse radar systems. In this paper, the antenna consists of polarizing grid, reflectarray, multimode feed horn, and comparator implemented by waveguide. The antenna is able to have three radiation patterns by using the monopulse feed systems assembled by multimode feed horn and comparator. The antenna demonstrates maximum gains 36 dB, 33.5 dB and 27.2 dB at sum mode, azimuth mode, and elevation mode respectively.

Key words : Monopulse, Reflectarray, Folded Reflectarray, Antenna, Comparator

I. 서 론

다양한 형태의 위치 추적 시스템은 sequential lobing과 simultaneous lobing 두 방식을 기반으로 발전되어 왔으며, 모노펄스 형식은 simultaneous lobing 방식의 한 종류이다. Sequential이나 simultaneous 방식 모두 목표물에서 반사된 전파 신호들을 비교하여 전파가 반사되어 돌아오는 각도를 결정한다. 이러한

방법은 대부분의 위치 추적 레이더 시스템에 적용되며, 모노펄스 형식은 이러한 전파 신호들의 비교를 동시에(simultaneously) 수행한다^[1]. 크기가 작고 측면의 깊이가 얇은 밀리미터 대역의 모노펄스 형태의 안테나는 위치 추적 레이더와 정교한 RF 센서 등 여러 응용 분야에서 사용될 수 있다. Folded reflectarray 안테나는 평면으로 제작 가능하므로 일반적인 parabolic 안테나에 비해 쉽게 제작 가능하며, 측면의

「This work was supported by SamsungThales R&D Team.」

이 논문은 삼성탈레스에 지원에 의하여 연구되었음.

서울대학교 전기공학부(School of Electrical Engineering, INMC, Seoul National University)

*삼성탈레스(Samsung Thales)

· 논문 번호 : 20071217-147

· 수정완료일자 : 2008년 1월 22일

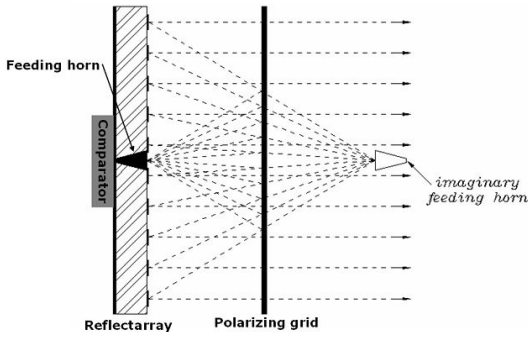


그림 1. 안테나 전체 구조도
Fig. 1. The antenna layout.

깊이도 얇다. 더 나아가 손실을 줄이고 높은 안테나 이득을 얻을 수 있다^[2]. 이러한 folded reflectarray 안테나는 60 GHz와 77 GHz 대역에서 설계 제작된 바 있으며, 빔 스캐닝 기법 또한 연구되어 왔다^[3]. 이에 따라 folded reflectarray 안테나를 모노펄스 형식의 레이다 시스템에 적용한다면 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그림 1은 모노펄스 folded reflectarray 안테나의 구조도이다. 이 안테나가 송신 안테나로 동작할 때는 feed horn에서 방사된 전파가 polarizing grid에서 반사되어 reflectarray에 도달하면 위상이 보정되고, 전파의 편파가 90도만큼 변화하여 다시 polarizing grid에 도달한다. 이때 전파가 90도 편파되었으므로 polarizing grid를 통과하여 송신 안테나로서 동작한다. 수신 안테나로 동작할 때는 위의 과정이 역으로 진행되며 수신된 신호를 컴퍼레이터가 받아 위치를 판단한다. 이러한 형태의 안테나가 2005년 말 제안되었으며, 기계적인 빔 스캐닝 구조를 채택하였다^[4]. 그런데 위의 논문은 모노펄스 안테나의 핵심 부품인 comparator에 대한 설명이 없으며, 안테나의 전체 구조를 조망하기가 어렵다. 본 논문에서는 94 GHz를 중심 주파수로 하는 reflectarray와 polarizing grid의 설계 과정을 보여준다. 또한, 수신 신호들의 크기를 비교하는 핵심 부품인 comparator와 다중 모드 feed horn의 설계 과정과 그 결과를 나타내었다. 그리고 제작된 각 부품들을 조립하여 최종적으로 모노펄스 folded reflectarray 안테나를 제작하였고, 그 결과를 본 논문에 보였다.

II. Reflectarray

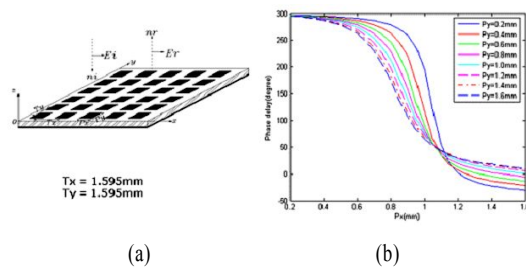


그림 2. (a) 주기적인 패치 구조, (b) 해석 결과
Fig. 2. (a) Periodic patch structures, (b) Phase results.

Reflectarray를 구성하는 소자는 대체적으로 마이크로스트립 패치 형태를 사용한다. 본 논문에서는 마이크로스트립 패치의 크기를 변화시켜 위상을 변화시키는 형태의 소자를 사용하였다. Reflectarray의 역할은 크게 두 가지로 볼 수 있으며, 이는 전체 개구면을 동위상으로 맞추어 주는 역할과 입사파의 편파를 90도 회전시키는 역할이다. Feed horn에서부터 발생된 전파가 m 번째 reflectarray의 소자에 도달하기까지의 경로와 reflectarray에서 원하는 개구면까지의 경로의 합을 l_m 라 두면 전체 위상 지연은 $-k_0 l_m$ 가 된다. 여기서 reflectarray의 소자에 의한 위상 변화를 ϕ_m 이라 두면 전체 위상 지연은 $-k_0 l_m + \phi_m$ 이 되고, 이때 모든 reflectarray의 소자에 의한 위상 변화가 동위상이 되도록 하면, 즉 식 (1)과 같이 되게 하면 feed horn에 의해서 방사된 전파는 개구면에서 모두 동위상이 된다. 여기서 N 은 정수이며, ϕ 는 고정된 상수이다.

$$-k_0 l_m + \phi_m = 2\pi N + \phi \quad (1)$$

마이크로스트립 패치는 그 크기에 따라 반사될 때의 위상이 변화하게 되는데, 패치가 무한 주기로 존재하는 경우로 가정하여 반사 위상을 구할 수 있다. 이렇게 반사 위상이 구해진 마이크로스트립 패치를 reflectarray의 소자로 사용할 수 있다. 또한, reflectarray는 편파를 90도 회전시키는 역할도 하여야 하므로 이를 해결하기 위해 마이크로스트립 패치의 축을 입사하는 전파의 편파 방향에 대하여 45도 기울이고 축 방향 편파와 다른 축 방향 편파에 의한 위상 변화가 한 쪽에서는 ϕ_m 이 되고, 다른 한 쪽에서는 $\phi_m + \pi$ 가 되도록 설계하여 이를 해결할 수 있다. 따

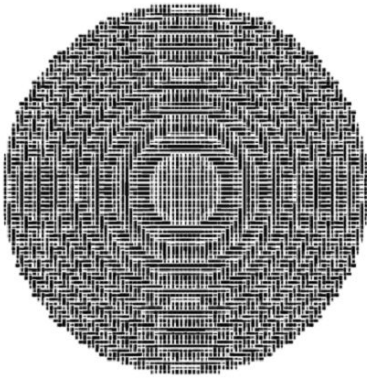


그림 3. Reflectarray의 설계도
Fig. 3. Layout of reflectarray.

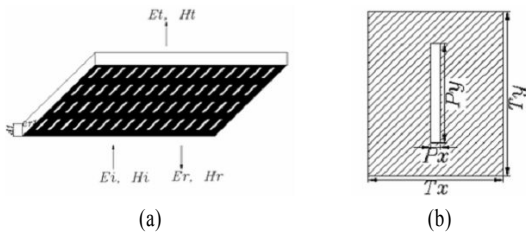


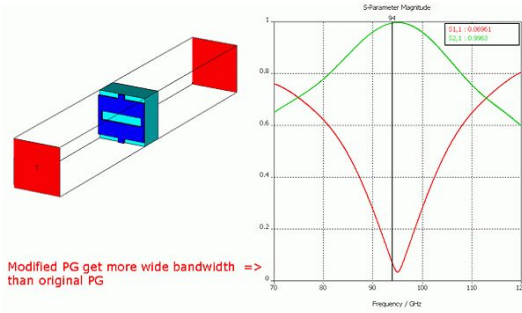
그림 4. (a) Slot 형태 polarizing grid의 구조, (b) 기본 단위 구조
Fig. 4. (a) Structure of slot type polarizing grid (b) Unit cell.

라서 reflectarray의 각 위치에서 소자들이 식 (1)을 만족하고 마이크로스트립 패치의 축방향과 다른 축방향의 반사 위상 변화가 180도 만큼 차이가 나게 되면 편파가 90도 회전함과 동시에 개구면에서의 위상을 동위상으로 맞출 수가 있다.

그림 2는 마이크로스트립 패치의 크기에 따른 반사 위상의 변화를 보여주며, 동작 주파수는 94 GHz이다. 주기적인 패치 구조에 대한 분석은 Eward 합과 Floquet 모드 기법을 이용한 수치 해석으로 이루어졌다^{[5]-[7]}. 그림 3은 reflectarray의 설계도이다.

III. Polarizing Grid

Polarizing grid는 원하는 편파는 투과시키고 원치 않는 편파는 반사시키는 편파 선택적인 투과 특성을 띄고 있다. Polarizing grid는 slot의 주기적인 배열을 이용한 방식과 dipole을 주기적으로 배열한 방식 등 여러 형태로 구현할 수 있으며, 여기서는 그림 4와



(a) 기본 단위 구조 (b) 시뮬레이션 결과
(a) Unit cell (b) Simulation result

그림 5. 상용 톨을 이용한 Polarizing Grid 시뮬레이션
Fig. 5. Simulation results of polarizing grid.

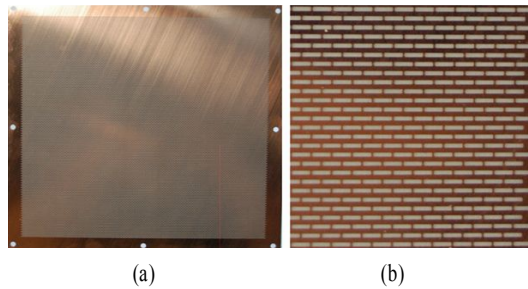


그림 6. (a) Polarizing grid 실물 사진, (b) 확대 사진
Fig. 6. (a) Photograph of polarizing grid, (b) Magnified photograph.

같이 slot을 주기적으로 배열한 형태를 사용하고자 한다. 해석 방법은 무한 주기 구조에 slot이 있는 경우, 평면파가 입사할 때의 투과파와 반사파의 비를 구하는 방법을 사용할 수 있으며, 이는 주기 구조 해석 방법으로 해석이 가능하다. 또, 다른 방법은 주기 구조의 가장 작은 단위 구조에 평면파가 입사하는 형태를 가정하고, 이에 대해 상용 시뮬레이션 프로그램을 사용하는 것이다. 현재 설계된 무한주기 구조 MOM 프로그램은 시간이 오래 걸리므로 그림 5와 같이 후자의 방법을 사용하여 실제 polarizing grid를 제작하였다. 그림 6는 제작된 polarizing grid의 실물 사진이다.

IV. Comparator Using Circular Cavity Hybrid

모노필스 형식의 레이더에 필수적으로 사용되는 comparator 회로는 feed horn으로부터 4 port의 입력

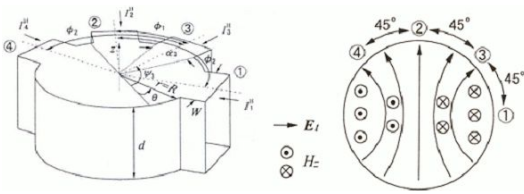
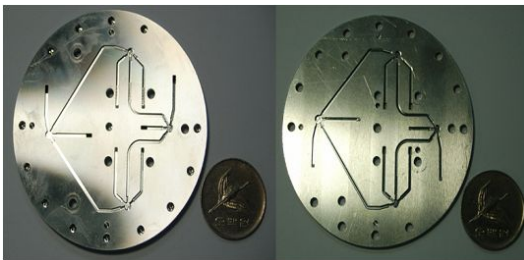


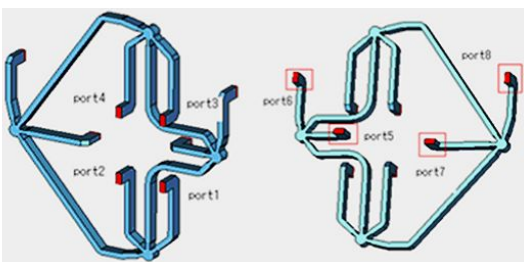
그림 7. Cylindrical cavity 구조와 TE111 공진 모드
Fig. 7. Cylindrical cavity structure and its TE111 resonant mode.

을 받아 이를 sum port, azimuth port, 그리고 elevation port 이렇게 3개의 출력으로 변환하는 회로이다. Comparator는 4개의 hybrid로 이루어지며, 본 연구에서는 cylindrical cavity hybrid를 설계하여 사용하였다^[8]. 그림 7을 통해 알 수 있듯이, cylindrical cavity는 TE111 공진이 생기면 기준으로부터 45°와 135°만큼 떨어진 곳의 위상차가 180°가 된다. 실제 hybrid를 제작할 때는 cavity에서 뺄어나가는 팔과 cavity간의 기생적으로 발생하는 reactive 성분을 제거하기 위해 약간의 step을 만들어 이를 보상하였으며, 원하는 성능이 나오기를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

그림 8은 comparator의 설계도와 실제 제작 사진



(a) 제작된 comparator의 내부 모습
(a) Photograph of fabricated comparator



(b) Comparator 설계도
(b) Layout of comparator

그림 8. Circular cavity를 이용한 comparator
Fig. 8. Comparator using circular cavity hybrid.

이다. Comparator는 94 GHz에서 동작하며, 파장은 3.2 mm이므로 매우 섬세한 공정을 필요로 한다. 실제 제작은 두 개의 금속판에 waveguide를 정밀하게 식각하고, 이 두 개의 판을 접합하는 방법으로 구현을 하였다. Comparator 회로 앞면의 4개의 port는 feed horn으로 연결되며, 전파를 받거나 보내는데 사용된다. 뒷면 4개의 port중 하나는 사용하지 않아 termination시키며, 나머지 3개는 각각 sum, azimuth, 그리고 elevation channel로 사용되어 물체의 위치를 판별하는데 사용된다^[9].

그림 9을 통해 알 수 있듯이 Comparator 회로는 S-parameter magnitude 측면에서 8 GHz 정도의 대역폭을 가진다. 하나의 입력 port에서 나온 전파는 4개의 출력 port로 나뉘어 들어가야 하므로 입력 port에서 들어간 파워의 1/4만큼 출력 port에서 나올 것이라 예상할 수 있고, 예상했던 바대로 입력 port에서 출력 port로 지나가는 power의 양은 -6 dB로 1/4이 됨을 확인할 수 있다.

그림 10에 나타낸 Phase delay 결과를 살펴보면, port 6의 시뮬레이션 결과에서는 4개의 입력 port에서 들어온 모든 신호의 위상이 동위상임을 확인할 수 있다. 이를 통해 port 6에서는 4개의 입력 port에서 들어온 전파가 합쳐짐을 확인할 수 있고, sum port임을 확정할 수 있다(측정된 결과와 차이가 발생하는 이유는 측정을 위해 측정용 plate를 부착했기 때문). 그리고 port 5에서는 port 1과 port 2, port 3과 port 4가 각각 동위상이며, 서로의 차이는 180°임을 확인할 수

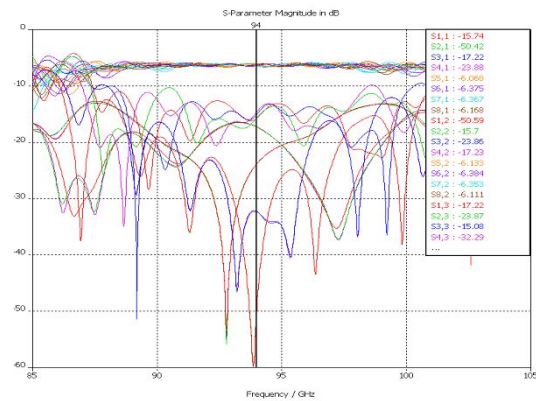


그림 9. 제작된 comparator의 S-parameter magnitude
Fig. 9. Measured S-parameter(magnitude) of the comparator.

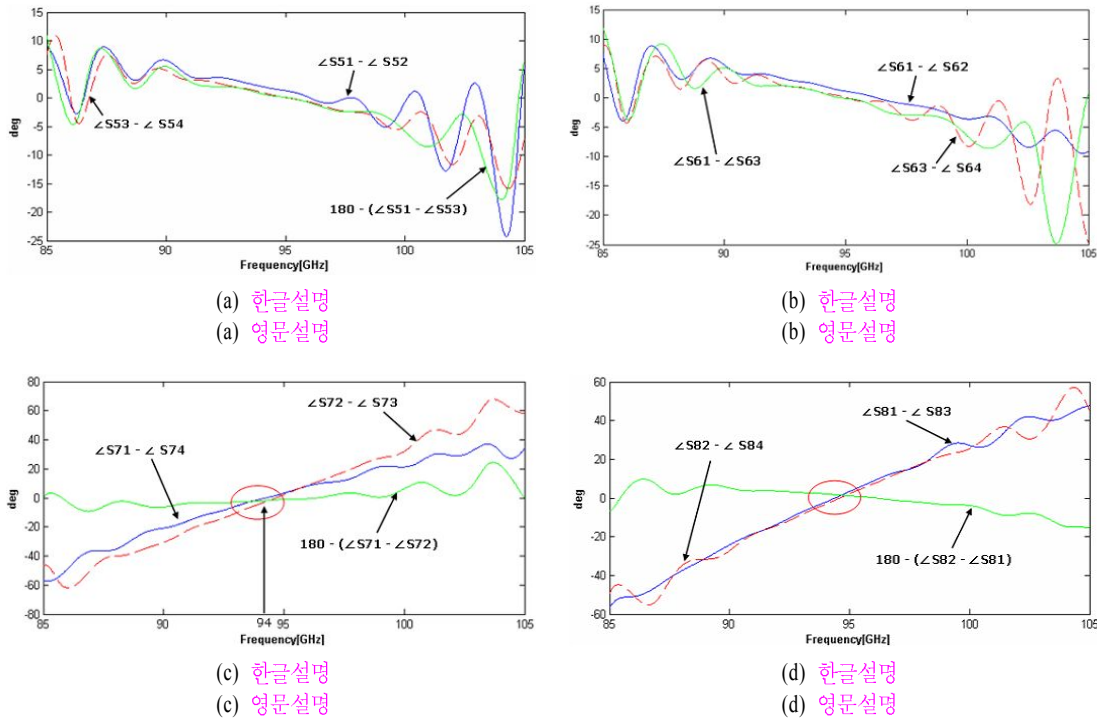


그림 10. Comparator의 위상 응답 결과
Fig. 10. Measured S-parameter(phase) of the comparator.

있다. 결국 port 5에서는 port 1과 port 2를 더하고 port 3과 port 4를 더한 후, 두 쌍을 서로 빼주는 것으로 설명할 수 있다. 이는 azimuth 방향의 위치를 판별하는데 사용되며, 이로써 port 5는 azimuth port임을 알 수 있다. Port 8에서는 port 1과 port 3, port 2와 port 4가 각각 동위상이며, 서로의 차이는 180°임을 확인할 수 있다. 결국 port 8에서는 port 1과 port 3를 더하고 port 2와 port 4를 더한 후, 두 쌍을 서로 빼주는 것으로 설명할 수 있다. 이는 elevation 방향의 위치를 판별하는데 사용되며, 이로써 port 8는 elevation

표 1. Null depth -20 dB를 만족하는 comparator의 대역폭

Table 1. Bandwidth of the comparator from the criterion of null depth(-20 dB).

	Port 5	Port 6	Port 7	Port 8
Magnitude(± 1 dB)	90.5 ~99.7	91.5 ~98.8	86.7 ~98.1	92.5 ~97.6
Phase($\pm 10^\circ$)	90.4 ~100.6	89.9 ~98.1	91.2 ~95.3	92.5 ~96.3

port임을 알 수 있다.

표 1은 제작된 Comparator가 -20 dB의 null depth를 얼마나 넓은 bandwidth에서 만족하는지를 보여준다. 표 1의 결과를 토대로 가장 극악의 경우에 comparator는 94 GHz를 중심으로 3.8 GHz의 bandwidth를 가짐을 확인할 수 있다.

V. Multimode Feed Horn

본 논문의 안테나에서 feed horn은 sum 모드, azimuth 모드, 그리고 elevation 모드를 모두 감당해야 한다. 이를 위해 여러 가지 모드가 혼용되어 나타나는 다중 모드 feed horn이 적합하다고 판단하였으며, 주파수가 높아서 파장이 짧은 점을 고려해 되도록 간단하면서도 원하는 특성을 보이는 구조를 채택하였다^[10].

그림 11은 간단한 다중 모드 feed horn의 한 형태이며, 본 논문에서는 이러한 구조를 이용하여 feeding 시스템을 구성하였다. 그림 11의 구조는 분기점이 두 개가 잇달아 있는 구조로 생각할 수 있고, 분기점

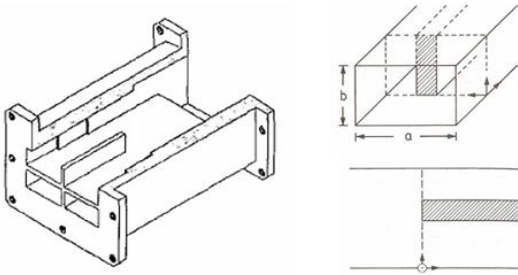


그림 11. Feed horn 구조와 분기점의 단면도
Fig. 11. Picture and layout of feed horn.

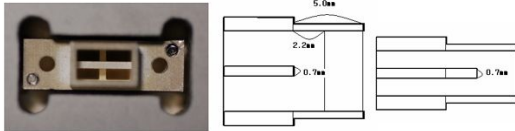
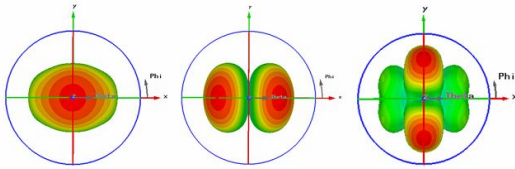


그림 12. 다중 모드 feed horn의 사진 및 설계도
Fig. 12. Photograph and layout of multimode feed horn.



(a) Sum 모드 (b) Azimuth 모드 (c) Elevation 모드
(a) Sum mode (b) Azimuth mode (c) Elevation mode

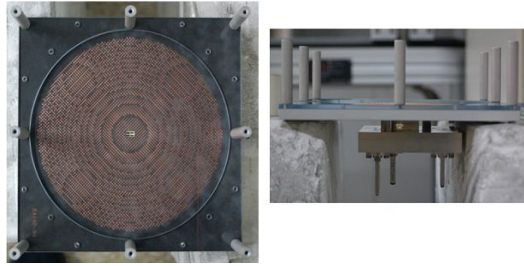
그림 13. 다중 모드 Feed Horn의 far field 패턴
Fig. 13. Far field patterns of multimode feed horn.

의 모드 분석법을 사용하여 feed horn의 aperture에서의 필드 형태를 예상할 수 있다. 이러한 분석 기법과 상용 프로그램의 시뮬레이션을 통하여 원하는 성능이 나오는 feed horn을 설계하였다.

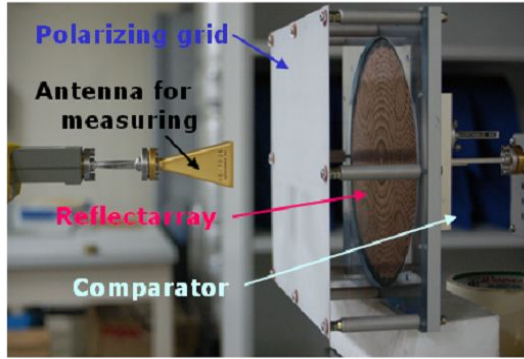
그림 12는 실제 제작한 다중 모드 feed horn의 사진과 설계도이며, 그림 13은 이러한 feed horn의 sum, azimuth, 그리고 elevation 세 모드에서의 far field 시뮬레이션 결과이다.

VI. Antenna Performance

그림 14는 지금까지 제안된 reflectarray, polarizing grid, comparator, 그리고 feed horn을 이용하여 제작한 완성된 안테나의 사진을 보여주며, W-band에서



(a) 제작된 안테나의 정면과 측면 사진
(a) Front and profile pictures of the antenna



(b) 안테나 패턴 측정 사진
(b) Photograph of measuring the antenna patterns

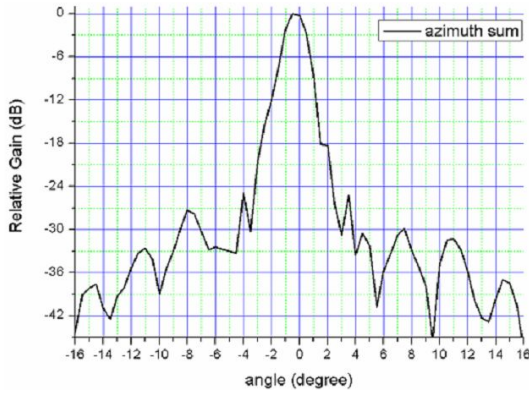
그림 14. 제작된 안테나의 사진과 측정 환경
Fig. 14. Photograph of the antenna and the measurement.

동작하는 소스 모듈과 하모닉 믹서를 이용하여 측정을 진행하였다. 그림 15는 제작된 W-band 안테나의 sum 패턴 결과이며, 위의 그림을 통해 확인할 수 있듯이 Half Power Beamwidth(HPB)는 azimuth 방향과 elevation 방향 모두에서 1.5°를 가진다. 측정된 결과를 바탕으로 안테나의 directivity를 구해 보면,

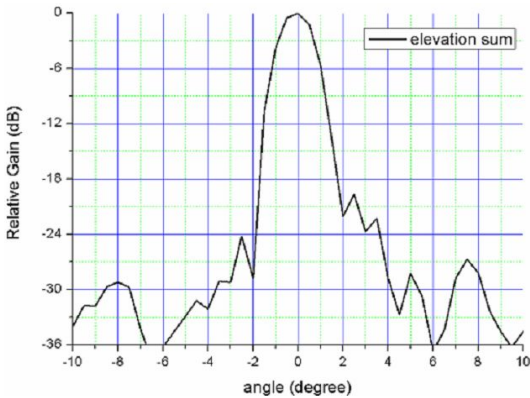
$$D_0 \cong \frac{32,400}{\Theta_{1d}\Theta_{2d}} = \frac{32,400}{1.5 \times 1.5} = 41.58 \text{ dB} \quad (2)$$

식 (2)와 같이 41.58 dB의 값을 이론적으로 얻을 수 있다. 그런데 측정된 이득이 36 dB이므로 5 dB 정도의 손실이 발생함을 확인할 수 있다.

그림 16은 제작된 안테나의 azimuth 패턴과 elevation 패턴을 나타내며, 각각의 gain은 33.5 dB와 27.2 dB이다. Azimuth의 경우, sum 패턴과 비교할 때 2.5 dB 정도 떨어지는데 반해, elevation의 경우에는 8.8 dB가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 feed horn



(a) 안테나의 azimuth 방향의 sum 패턴
(a) Sum pattern of the antenna(azimuth direction)



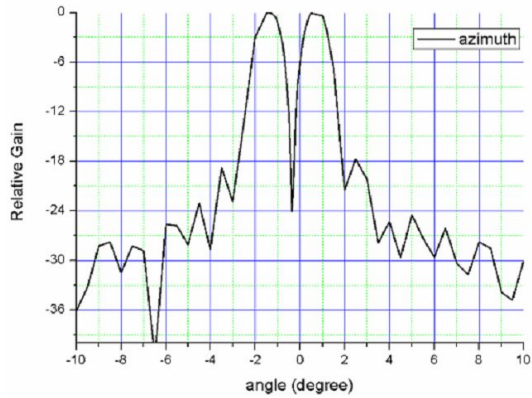
(b) 안테나의 elevation 방향의 sum 패턴
(b) Sum pattern of the antenna(elevation direction)

그림 15. 안테나의 sum 모드에서의 방사 패턴
Fig. 15. Far field patterns of the antenna in the sum mode.

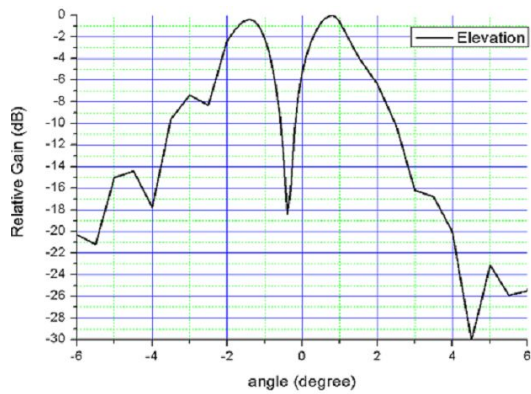
자체적으로 elevation 모드에서 동작할 때 azimuth 모드의 경우에 비해 큰 반사계수를 가지기 때문이다.

VII. 결 론

본 논문에서는 94 GHz를 중심 주파수로 하며, 모노펄스 형식의 위치 추적 레이더에 사용되는 folded reflectarray 안테나를 제안하였다. 본 논문의 안테나는 reflectarray, polarizing grid, comparator, 그리고 다중 모드 feed horn으로 구성되며, 각 부품의 제작 방법과 성능을 나타내었다. 제안된 안테나는 쉽게 제작이 가능하며, 측면의 깊이는 5.26 cm로 매우 얇다. 그리고 모노펄스 급전부는 도파관으로 제작이 되어



(a) 안테나의 azimuth 방사 패턴
(a) Azimuth pattern of the antenna



(b) 안테나의 elevation 방사 패턴
(b) Elevation pattern of the antenna

그림 16. 안테나의 azimuth, elevation 방사 패턴
Fig. 16. Far field patterns of the antenna in the azimuth and elevation mode

높은 power를 사용하는 시스템에도 사용 가능하다. 이에 따라 본 논문에서 제안한 안테나는 작은 크기와 높은 파워를 필요로 하는 W-band의 모노펄스 레이더 시스템이나 RF 센서 등에 매우 유용하게 사용될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. R. Rhodes, *Introduction to Monopulse*, New York: McGraw-Hill, pp. 2-7, 1959.
- [2] D. Pilz, W. Menzel, "Folded reflectarray antenna", *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 9, pp. 832-833, Apr. 1998.

- [3] W. Menzel, D. Pilz, and M. Al-Tikriti, "Millimeter-wave folded reflector antennas with high gain, low loss, and low profile", *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 44, no. 3, pp. 24-29, Jun. 2002.
- [4] D. R. Jahagirdar, J. V. Prasad, "A W-band trans-twist monopulse microstrip patch reflectarray", *Radar Conference, 2005. EURAD*, pp. 197-199, Oct. 2005.
- [5] R. Mittra, C. H. Chan, and T. Cwik, "Techniques for analyzing frequency selective surface - A review", *Proceeding of IEEE*, vol. 76, no. 12, pp. 1593-1615, Dec. 1998.
- [6] M. Park, "A study on the efficient analysis of shielded and periodic microwave structures using Ewald sum technique", Ph. D. dissertation, Univ. Seoul National, Seoul, Korea, 1998.
- [7] J. Ko, "Analysis and application of electromagnetic scattering by a two-dimensional periodic array", Ph. D. dissertation, Kyungpook National Univ., Taegu, Korea, 1997.
- [8] M. Kishihara, "Analysis and desing of radial waveguide e-plane hybrids", *1999 Asia Pacific Microwave Conference Proc.*, vol. 2, pp. 500-503, Nov. 1999.
- [9] H. Lee, J. Chun, and S. Nam, "94 GHz waveguide monopulse comparator using circular cavity hybrid", *MINT-MIS2007/TSMW2007/MilliLab Workshop*, Seoul, Korea, pp. 115-118, Feb. 2007.
- [10] P. W. Hannan, "Optimum feeds for all three modes of a monopulse radar I, II: Theory and practice", *IRE Transactions on Antenna and Propagation*, pp. 444-461, Sep. 1961.

이 한 승



2006년 2월: 고려대학교 전기전자
진파공학 (공학사)
2006년~현재: 서울대학교 전기과
석사과정
[주 관심분야] 안테나 및 수동소자,
주기 구조 및 Metamaterial

전 중 훈

1982년 2월: 전북대학교 (공학사)
1985년 2월: 한양대학교 (공학석사)
2002년 2월: KAIST (공학박사)
1985년 1월~2002년 9월: LG 이노텍 근무
2002년 10월~2004년 10월: 단암 시스템 근무
2004년 11월~현재: 삼성탈레스 선임수석연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템 설계

채 희 덕



1999년 2월: 서울대학교 전기과 (공
학사)
2001년 2월: 서울대학교 전기과 (공
학석사)
2001년~현재: 서울대학교 전기과 (공
학박사)
[주 관심분야] 전자기 수치 해석,
Frequency Selective Surface

남 상 욱



1981년 2월: 서울대학교 전자공학
과 (공학사)
1983년 2월: KAIST (공학석사)
1987년 2월: University of Texas at
Austin 전기과 (공학박사)
2001년 2월~2002년 1월: 미 Univer-
sity of California, San Diego 교환

교수
현재: 서울대학교 전기공학과 정교수
[주 관심분야] Microwave & Millimeterwave Active/Passive
Circuit Design