

# 자동 주행 차량을 위한 24 GHz 3-Beam Scan 안테나의 설계 및 제작

## Design and Fabrication of 24 GHz 3-Beam Scan Antennas for ACC Applications

원영진 · 이영주 · 공영균 · 김영수

Young-Jin Won · Young-Ju Lee · Young-Kyun Kong · Young-Soo Kim

### 요 약

운전자의 편의를 위한 자동 주행 차량은 전방 차량의 방향을 인식하며 차량 간의 거리를 유지하기 위한 시스템이 요구된다. 본 논문은 24 GHz 대역에서 움직이는 차량의 방향 감지를 위한 마이크로스트립 배열 안테나를 제안하였다. 넓은 빔 폭을 가지는 8×2 송신 배열 안테나와 좁은 빔 폭을 가지는 8×4의 수신 center 배열 안테나, 8×8의 수신 left, right 배열 안테나를 각각 설계 제작 하였다. 측정 결과 송신 안테나의 경우 50°의 방위각 빔 폭과 16.7 dBi의 이득을 가지며, 수신 안테나의 경우 center, left, right 배열 안테나 각각 20°, 13°, 13°의 방위각 빔 폭과 20 dBi 이상의 이득을 가진다. 또한 left, right 배열 안테나의 경우 ±18°의 지향각이 요구되는데 이를 잘 만족함을 알 수 있다. 측정된 방사 패턴은 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였으며 따라서 설계된 안테나는 전방 차량이 scan 각도 이내에 들어오면 3개의 방향을 감지하는데 적합함을 알 수 있다.

### Abstract

For driver's convenience, the ACC(Adaptive Cruise Control) requires a system which determines the direction of vehicles and controls the vehicle to keep the distance among the automobiles constant. This paper describes the microstrip array antennas designed to operate at 24 GHz, and used as a direction indicator of moving vehicles. 8×2 transmit array antenna with wide beamwidth, 8×4 receive center array antenna, and two 8×8 receive array antennas with narrow beamwidth were designed and fabricated. Measurement results for the arrays showed that the azimuthal beamwidth is 50° and the gain is 16.7 dBi for the transmit array antenna. For the receive array antenna, the center, the left, and the right array antenna have beamwidths of 20°, 13°, 13° respectively, and have gains of more than 20 dBi. The left and right array antenna have the beam tilt angle of ±18°. The measured radiation patterns showed a good agreement with the simulated patterns, and the designed array antennas are suitable for detecting 3 directions of the vehicle within the scan angle area.

Key words : ACC, Beam-Scan, FMCW Radar, Aperture-Coupled Microstrip Antenna, Corporate Feed

### I. 서 론

국내외적으로 자동차의 급격한 증가로 인한 사고

및 피해가 증가함에 따라 지능형 교통 시스템(ITS: Intelligent Transportation System)의 도입이 적극적으로 추진되고 있다. 지능형 교통 시스템에서 자동

포항공과대학교 전자전기공학부(Dept. of Electronic and Electrical Engineering, POSTECH)

· 논문 번호 : 20021102-13S

· 수정완료일자 : 2002년 12월 17일

차의 제어를 위해 주행 중인 자동차에 전 후방 및 측방의 주변환경에 대한 정보를 제공할 수 있는 센서가 요구되며 이를 위해 초음파, 적외선, 레이저, 밀리미터파 레이더 및 화상 센서 등이 고려된다. 이 중에서 온도와 습도에 대한 영향이 적으며 정확한 거리 및 상대 속도 측정이 가능한 밀리미터파 레이더 방식이 선호되는데, 밀리미터파 레이더 방식 중 비교적 설계가 간단하며 정확한 거리 및 속도 정보를 제공하는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 방식이 적합하며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 주파수 표준은 미국과 일본 및 유럽을 중심으로 24 GHz, 60 GHz, 77 GHz 대역에서 연구 중에 있다. 그 중에서 근거리 용으로는 24 GHz가, 장거리 용으로는 77 GHz 대역이 표준화 되는 추세에 있다<sup>[1]</sup>.

현재 각국의 기술적인 연구 경향은 소형화 및 대량생산을 위한 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 제작 기술 및 낮은 단면의 안테나와 multi-target을 감지하기 위한 multi-beam 평판 안테나 제작 기술에 맞춰져 있다. 안테나 제작 기술에 있어서 주로 쓰이는 안테나는 slotted waveguide 배열 안테나, lens 안테나, 마이크로스트립 배열 안테나 등이다. Slotted waveguide 안테나는 단면이 낮으며 효율이 높지만 대량 생산이 어렵고, lens 안테나는 역시 효율이 높지만 자동차에 장착하기에는 부피가 크며, 마이크로스트립 배열 안테나의 경우 단면이 낮으며 제작이 용이하여 대량 생산이 가능하므로 자동차에 장착하기에 가장 적합하다고 하겠다<sup>[2]</sup>. 그리고 안테나 제작 기술에서 실제 도로 환경은 도로에서의 곡률이 고려되어야 하며 multi-target과 주변 환경에 대한 간섭이 존재하므로 beam-scan 방식의 안테나를 구현한다. 스캔 방식으로는 기계적인 조작에 의한 mechanical-scan 방식과 안테나의 급전 점을 스위칭하는 switched-beam scan 방식, 그리고 위상 가변에 의한 electronically-beam scan 방식이 주로 사용된다. Mechanical-beam scan 방식은 폭이 좁은 패턴을 생성하여 높은 분해능을 유지할 수 있지만 기계적인 신뢰도가 선행되어야 하며 안테나의 크기가 커진다는 단점이 있으며, switched-beam scan 방식은 분해능은 낮으나 간단한 구조로 구현될 수 있어서 안테나의 크기를 줄일 수 있다는 장점이

있다. 또한 phased array 기술을 이용하는 electronically-beam scan 방식은 앞으로 많은 연구가 이루어질 추세이며 구현의 복잡성과 비용이 많이 든다는 단점이 있다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 근거리에서 전방 3개의 차선을 스캔할 수 있는 3-beam switched-beam scan 방식의 개구 결합형(aperture-coupled) 급전 구조의 마이크로스트립 배열 안테나를 설계 및 제작하여 3-beam scan 안테나를 구현하였다.

## II. 안테나 사양 결정

일반적인 FMCW 레이더는 VCO(Voltage Controlled Oscillator)의 주파수를 시간에 따라 선형적으로 변조시켜 송신하고 표적에 대해 반사된 수신 주파수와 송신 주파수의 차 주파수에 의해 거리 및 상대 속도 정보를 산출해낸다<sup>[4]</sup>.

그림 1은 24 GHz 대역의 FMCW 레이더 시스템의 block diagram이다<sup>[5]</sup>.

그림 1에서 보면 250 MHz의 대역폭을 가지는 신호를 넓은 빔 폭을 가지는 송신 안테나에서 송신된 후, 좁은 빔 폭을 가지는 3 개의 수신 안테나를 RF 스위치로써 순차적으로 스위칭하여 전방 차량이나 장애물의 방향과 거리를 측정할 수 있게 시스템을 설계하였다.

즉 수신 안테나의 3개의 좁은 빔이 자기 자신의 차선과 인접한 두 개의 차선을 관측할 수 있다. 그림 2에서 보면 도심지에서의 도로 1차로의 일반적인 폭을 3.25 m 라고 하고(한국도로공사 규격) 전방 차량과의 거리를 10 m라고 했을 때 가운데 차선의

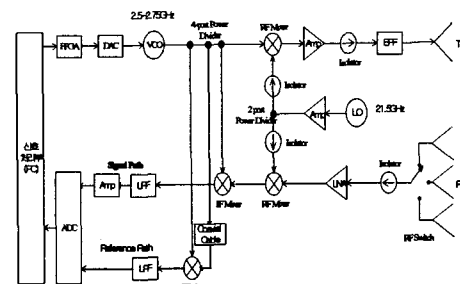


그림 1. FMCW 레이더 시스템 구성도  
Fig. 1. Block diagram of FMCW radar system.

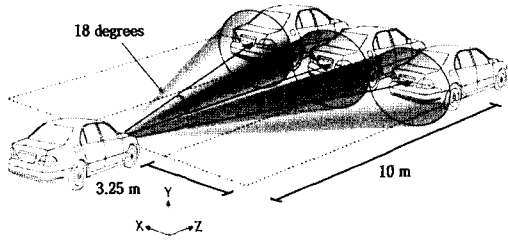


그림 2. 빔 scan 구성도  
Fig. 2. Configuration of beam scan.

표 1. 안테나 설계 목표 사양  
Table 1. Specification of antenna design.

Parameter	Tx Array	Rx Array
Freq. Band	24 GHz ~ 24.25 GHz	
Az. Beam No.	1	3
Beam overlapping level	-	-3 dB
Az. Beamwidth	52°	15°, 20°, 15° (L, C, R)
Beam tilt angle	0°	+18°, 0°, -18° (L, C, R)
El. Beamwidth	10°	10°
Gain	>> 15 dBi	>> 20 dBi
Sidelobe level (SLL)	< -20 dB	< -20 dB

중심에서 인접 차선의 중심까지는 약 18° 정도 빔이 기울어지며 가운데 빔의 3 dB 빔 유효 영역은 약 20°, 좌·우 빔의 3 dB 빔 유효 영역은 약 15°임을 알 수 있다. 따라서 azimuth 방향으로는 송신 안테나의 빔 폭은 52°, 수신 안테나의 빔 폭은 center 배열 안테나가 20°로 left, right 배열 안테나가 각각 15°의 빔 폭으로 설계하고, elevation 방향으로는 각각 지면으로부터의 반사파의 영향을 줄이기 위하여 10°의 빔 폭을 목표로 설계한다. 이득은 송신의 경우 15 dBi 이상, 수신은 각각 20 dBi 이상으로 설계하며 불필요한 간섭신호의 제거를 위해 side-lobe level은 -20 dB 미만을 목표로 설계한다.

이상으로 결정된 안테나의 설계 목표 사양을 정리하면 표 1과 같다.

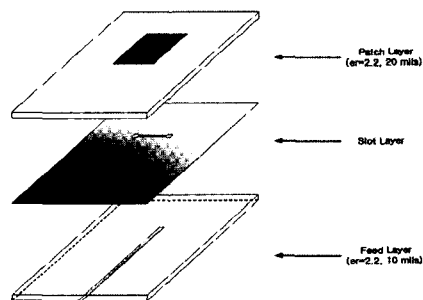
### Ⅲ. 안테나 설계

자동차용 레이더의 경우 미리 결정된 field-of-view(FOV) 안에서 전방 차량의 방향을 결정할 수 있어야 하므로 높은 방향성과 불필요한 간섭신호의 제거를 위해 낮은 side-lobe level이 요구되며 차량에 장착하기 위해서 낮은 단면이어야 한다<sup>[6]</sup>.

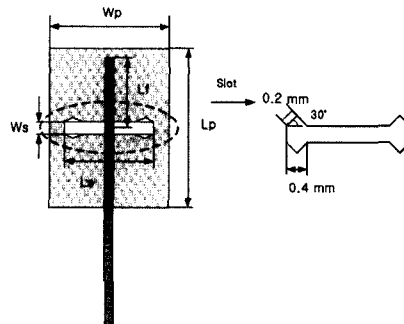
이를 위해 마이크로스트립 안테나로 설계하였고 그 중에서도 개구 결합형 급전 구조를 사용하였다. 이것은 방사부와 급전부를 분리함으로써 독립성을 유지하며 급전 회로에 의한 불필요한 방사를 막음으로 인해 정확한 빔 패턴을 얻을 수 있으며 향후 능동소자들과의 집적화를 위함이다<sup>[7]</sup>.

개구 결합형 안테나의 기본 구조는 방사부는 직사각형 patch를 사용하였고, 슬롯의 크기를 늘리지 않고 커플링을 개선하기 위하여 dogbone 형태의 슬롯을 사용하였다. 그림 3은 설계한 24 GHz 단일 안테나의 구조와 단일 안테나의 반사 계수 및 방사 패턴의 시뮬레이션 결과이다.

방사부의 경우 유전율  $\epsilon_r=2.2$ , 20 mils=0.508 mm 두께의 기판을 사용하였으며 급전부의 경우 높은 주파수에서의 불필요한 방사를 줄이기 위하여 유전율  $\epsilon_r = 2.2$ , 얇은 두께의 10 mils=0.254 mm의 Rogers사의 RT Duroid 5880 기판을 사용하였으며, 시뮬레



(a)



(b)

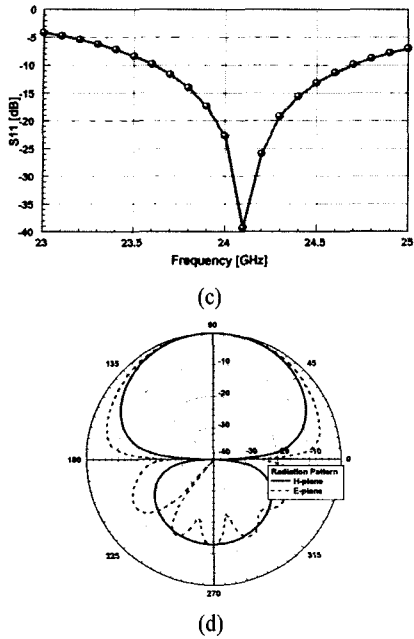


그림 3. 단일 안테나의 구조 및 시뮬레이션 결과  
 (a) 단일 안테나의 구조, (b) 단일 안테나의 크기 ( $L_p=3.44$ ,  $W_p=2.7$ ,  $L_s=2.0$ ,  $W_s=0.25$ ,  $L_f=1.5$  단위 mm), (c)  $S_{11}$ , (d) 24 GHz에서의 방사 패턴

Fig. 3. Structure of the single antenna and the simulation results. (a) Structure of the single antenna, (b) Size of the single antenna ( $L_p=3.44$ ,  $W_p=2.7$ ,  $L_s=2.0$ ,  $W_s=0.25$  unit mm), (c)  $S_{11}$ , (d) The radiation pattern at 24 GHz

이선은 Ansoft사의 Ensemble 5.1을 사용하였다.

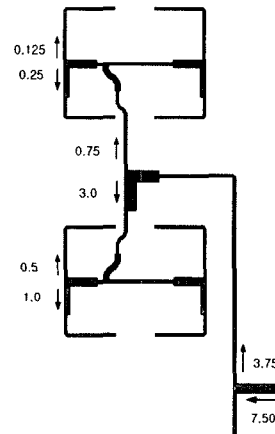
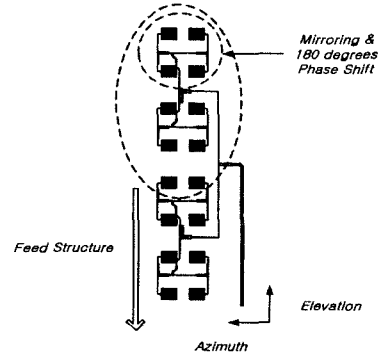
반사 계수 특성을 보면 VSWR 2 이하의 대역폭을 기준으로 약 1 GHz이므로 공진주파수에 대해 약 4 % 정도의 대역폭을 가진다.

송수신 배열안테나의 급전 방식은 FMCW 방식을 사용하므로 series 급전 방식보다는 주파수의 영향을 덜 받는 corporate 급전 방식을 채택하였으며 밀리미터파 대역에서의 높은 임피던스에서의 손실을 최소화하기 위하여 안테나 끝단의 급전선 임피던스를 100  $\Omega$ 으로 제한하였다.

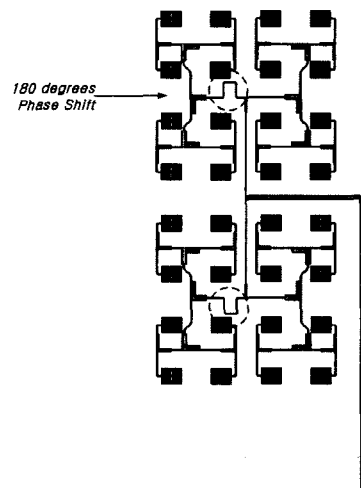
그림 4는 1개의 송신 안테나와 2개의 수신 안테나의 구조 및 급전선 구조이다.

송신 배열 안테나의 경우 azimuth 방향으로는  $52^\circ$ 의 넓은 빔 폭을 elevation 방향으로는  $10^\circ$ 의 좁은 빔

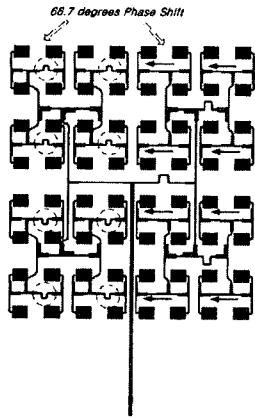
폭을 얻어내기 위해  $8 \times 2$  배열 구조로 설계하였고 넓은 azimuth 빔 폭을 얻어내기 위한 방사 소자간 좁은 공간( $0.5 \lambda_0=6.22$  mm)의 문제점을 mirroring 기법을 사용하여 해결하였으며 이 때 발생하는 방사 소자간 cross polarization을 제거하기 위해  $180^\circ$ 의 위상 차



(a) Tx Array(11.42 mm  $\times$  63.6 mm)



(b) Rx Center Array(31.3 mm  $\times$  63.6 mm)



(c) Rx Left Array(57.42 mm×63.6 mm)

그림 4. 송수신 배열 안테나의 구조 및 급전구조  
 (a) 송신 배열 안테나 및 급전구조,  
 (b) 수신 center 배열 안테나,  
 (c) 수신 left 배열 안테나

Fig. 4. Structure of the transmit and receive array antennas and structure of the feed line.

(a) Transmit array antenna and feed structure, (b) Receive center array antenna, (c) Receive left array antenna

를 주는 기법을 사용하였다<sup>[8]</sup>. 그리고 elevation의 좁은 빔 폭( $10^\circ$ )과 20 dB 미만의 side-lobe level을 얻기 위해 방사 소자간 간격은  $0.7 \lambda_0$ 로 하였고 급전의 용이성을 위하여 전력 분배 비율은 1 : 2 : 4 : 8 : 8 : 4 : 2 : 1로 설계하였다.

수신 배열 안테나에서 center 배열 안테나는  $20^\circ$ 의 좁은 azimuth 방향으로의 빔 폭과  $10^\circ$ 의 elevation 방향의 빔 폭을 위해 8×4 배열 구조로 설계하였고, azimuth 방향의 방사 소자간 간격은  $0.7 \lambda_0$ 로 하였고 전력은 1 : 4 : 4 : 1로 분배하였으며 elevation 방향은 송신 배열 안테나와 동일한 방사 소자간 간격과 전력 분배비로 설계하였다.

Left, right 배열 안테나는  $15^\circ$ 의 azimuth 방향의 빔 폭과  $10^\circ$ 의 elevation 빔 폭으로  $18^\circ$ 만큼 빔이 지향되도록 설계하였다. 이 때 원하는 빔 폭과 빔 tilt angle을 만족하기 위해 8×8배열로 설계하였다. 빔 tilt angle을 위한 left, right 배열의 방사 소자간 위상차는  $66.7^\circ$ 이며 이를 위해 급전 길이를 시뮬레이션을 통하여 가변하였다. Right 수신 배열 안테나는 left 수신 배열 안테나의 대칭 형태이므로 그림에

서 생략하였다.

#### IV. 제작 및 측정 결과

제작한 안테나는 HP사의 8722ES vector network analyzer를 이용하여 입력 반사 계수와 입력 임피던스 및 VSWR을 측정하였으며 포항공대의 compact range에서 방사 패턴 및 이득을 측정하였다.

그림 5는 최종 제작한 안테나의 사진이다.

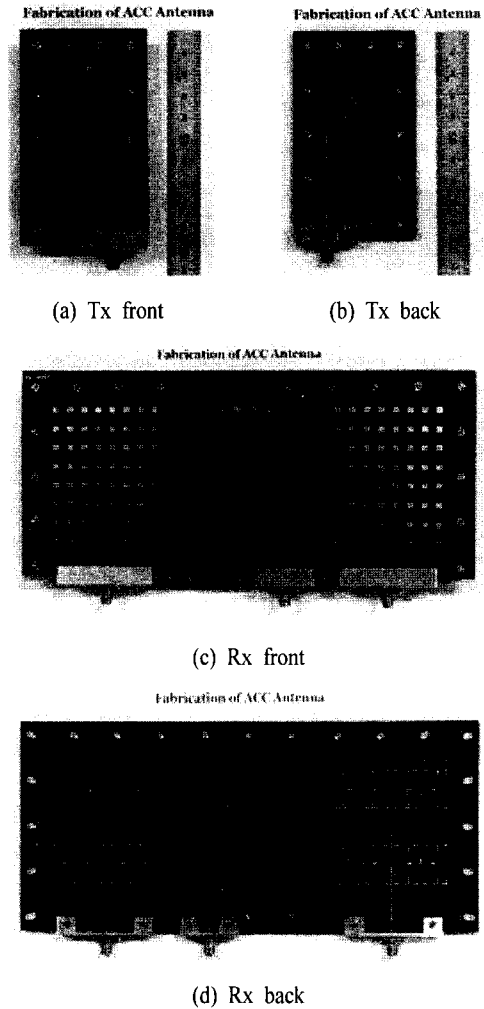


그림 5. 최종 제작 안테나  
 (a) 송신 전면, (b) 송신 후면, (c) 수신 전면, (d) 수신 후면

Fig. 5. Final fabricated antenna.  
 (a) Transmit front, (b) Transmit back, (c) Receive front, (d) Receive back

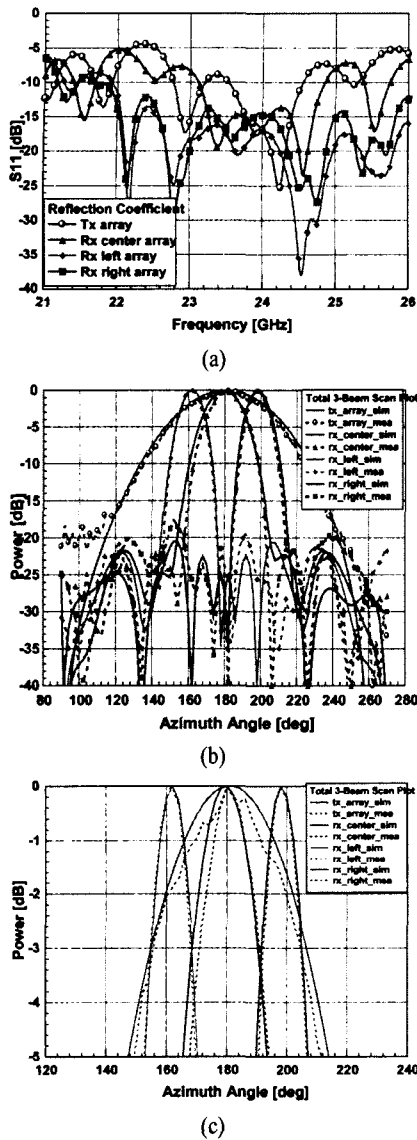


그림 6. 최종 제작 안테나의 측정 결과  
 Fig. 6. Measurement results of the final fabricated antenna.

(a)  $S_{11}$ , (b) 방사 패턴, (c) 확대된 방사 패턴

안테나의 실제 크기는 송신 배열 안테나는 57.0 mm×96.9 mm이고 3개의 수신 안테나를 합친 수신 배열 안테나는 236.22 mm×96.9 mm이다. 따라서 두 개의 송수신 배열 안테나를 합친 안테나의 전체 크기는 293.22×96.9 mm이다. 실제 안테나의 측정은 주파수 대역 K-band에서 SMA 커넥터의 특성의 저

하가 나타나므로 40 GHz 까지 사용 가능한 K-커넥터를 사용하였고 이를 안테나와 접합하기 위한 지그는 설계 제작하였다.

그림 6은 최종 제작 안테나의 측정 결과이다. 입력 반사 계수는 21 GHz~26 GHz의 주파수 범위로 측정되었고 방사 패턴은 23 GHz~25 GHz의 주파수 범위로 측정되었으며 방사 패턴 결과는 24 GHz에서의 결과이다.

그림 6(a)의 입력 반사 계수를 보면 24 GHz~24.25 GHz의 250 MHz 대역폭에서 송신 및 수신 center 배열 안테나는 잘 만족함을 알 수 있으며 수신 left 및 right 배열 안테나는 아주 좋은 광대역 특성을 나타냄을 알 수 있다.

3-beam scan 안테나의 가장 중요한 요구 특성인 그림 6(b)의 azimuth 방사 패턴을 보면 송신 배열 안테나의 빔 폭은 약 50°를 그리고 3개의 left, center, right 배열 안테나의 빔 폭은 각각 13°, 20°, 13°를 가짐을 알 수 있으며 시뮬레이션 결과와 비교하면 송신의 경우 설계 목표(52°)보다 약 2° 정도 빔 폭이 좁아지며 left, right 수신 배열 안테나의 경우 역시 설계 목표(15°)보다 약 2°씩 좁아지는 결과를 보였으며 +18°와 -18°의 left, right 수신 배열 안테나의 빔 tilt angle은 역시 잘 만족하였다. 그리고 side-lobe level은 right 수신 배열 안테나의 경우 약간 높아지는 것을 제외하면 송수신 배열 안테나 모두 약 -20 dB 미만을 잘 만족하므로 빔 패턴의 경우 측정 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

그림 6(c)의 확대된 azimuth 방사 패턴을 보면 넓은 빔 폭의 송신 안테나를 -3 dB를 경계로 3개의 좁은 빔 폭의 수신 안테나가 잘 커버함을 알 수 있으며 따라서 전방 3 개의 차선을 스캔하는데 적합함을 알 수 있다. 그리고 송수신 배열 안테나의 elevation 방향으로의 방사 패턴은 설계 목표인 빔 폭 10°와 side-lobe level 20 dB 미만을 잘 만족하였으며 전방 방향을 식별하기 위한 azimuth 빔 패턴에 비해 중요한 요구 사항이 아니므로 그림에서 생략하였다. 그리고 이득의 경우 standard gain horn 안테나를 기준 안테나로 측정하여 안테나의 이득 값을 환산하였다. 측정 결과는 송신 배열 안테나의 경우 16.7 dBi, 그리고 수신 center, left, right가 각각 20.2

표 2. 최종 측정 결과 요약(괄호 안은 목표 사양)  
Table 2. Summary of the final measurement results.

	Tx Array	Rx Center	Rx Left	Rx Right
Azimuth (degrees)	50 (52)	20 (20)	13 (15)	13 (15)
Elevation (degrees)	12 (10)	10 (10)	10 (10)	10 (10)
Gain (dBi)	16.7 (15)	20.2 (20)	21.8 (20)	21.6 (20)
SLL (dB)	-	-21 (-20)	-19 (-20)	-18 (-20)
Return loss max (dB)	-17 (-10)	-14 (-10)	-17 (-10)	-15 (-10)

dBi, 21.8 dBi, 21.6 dBi의 이득을 가졌으며 이에 따른 안테나의 효율은 각각 송신의 경우 68 %, 수신 center, left, right 가 각각 50.8 %, 47.8 %, 45.7 %로 계산됨에 따라 배열의 수가 많아짐에 따라 안테나의 효율이 점점 줄어들음을 확인할 수 있었다.

마지막으로 개구 결합 급전 방식의 특징 중 하나인 front-to-back ratio는 -15 dB 정도로 측정되었으며 최종 측정 결과를 요약해 보면 표 2와 같다.

### V. 결 론

본 논문은 개구 결합 급전 방식을 사용한 마이크로스트립 배열 안테나로써 자동 주행 차량을 위한 24 GHz switched-beam scan 방식의 3-beam scan 안테나를 설계 제작하였다. 안테나의 설계에는 Ansoft사의 Ensemble 5.1을 사용하였으며 측정에는 HP사의 8722ES vector network analyzer와 포항공대의 compact range를 이용하였다.

제작된 안테나의 특성을 측정한 결과 입력반사계수 -10 dB 미만의 주파수 대역폭은 24 GHz~24.25 GHz의 대역을 모두 만족하였고 원하는 패턴 특성을 정확하게 얻음을 확인하였다. 안테나의 이득은 송신, 수신 center, left, right 각각 16.7 dBi, 20.2 dBi, 21.8 dBi, 21.6 dBi를 얻었고, side-lobe level 역시 -20 dB 미만을 잘 만족함을 알 수 있다.

제작한 안테나를 실제 FMCW레이더 시스템과 RF switch를 사용하여 적용시켜 본 결과 만족스러

운 결과를 얻었다.

향후 RF switch를 안테나에 집적하여 beam switching 모듈로 제작하거나 위상 배열기법의 선형 연구로써 좋은 응용분야가 될 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] *IEEE MTT-S 2002 Microwave Symposium Workshop Notes, Automotive Radars & Prospective Circuit/ Antenna Technologies From, "Car Collision Avoidance" To "Autonomous Driving"*.
- [2] Hideo Iizuka et al., "Millimeter-Wave Microstrip Array Antenna with High Efficiency for Automotive Radar Systems", *R & D Review of Toyota CRDL*, vol. 37 no. 2.
- [3] Mark E. Russel et al., "Millimeter-Wave Radar Sensor for Automotive Intelligent Cruise Control (ICC)", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 12, Dec 1997.
- [4] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, 1981.
- [5] 김찬현, 김수범, 공영균, 김영수, "차량용 근거리 계측을 위한 고분해능 FMCW 레이더의 구현", 한국전자과학회 종합학술발표회 논문집 vol. 11, pp. 324-327, 2001년.
- [6] F. Kolak et al., "A low profile 77 GHz three beam antenna for automotive radar", *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, vol. 2, pp. 1107-1110, 2001.
- [7] R. Garg et al., *Microstrip Antenna Design Handbook*, Artech House, 2001.
- [8] J. Huang, "A parallel-series-fed microstrip array with high efficiency and low cross polarization", *Microwave Opt. Technol. Lett* 5, pp. 230-233, 1992.
- [9] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, Wiley, 1997.
- [10] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Wiley, 1998.

원 영 진



2001년 2월: 경북대학교 전자전기 공학부 (공학사)  
2001년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 석사과정  
[주 관심분야] 안테나 설계, 초고 주파 시스템

공 영 균



1998년 2월: 포항공과대학교 전자 전기공학과 (공학사)  
2000년 2월: 포항공과대학교 전자 전기공학과 (공학석사)  
2000년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
[주 관심분야] 레이더 시스템, SAR 신호처리, 디지털신호처리

이 영 주



1998년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)  
2000년 2월: 포항공과대학교 전자 전기공학과 (공학석사)  
2000년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정  
[주 관심분야] 마이크로스트립 안테나 설계, 초고주파 능동 수동 소자 설계

김 영 수



1974년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
1980년: University of Kansas 전자 공학과 (공학석사)  
1984년: University of Kansas 전자 공학과 (공학박사)  
1974년~1977년: 국방과학연구소 연구원  
1978년~1983년: Remote Sensing Laboratory, Univ. of Kansas 연구원  
1983년~1987년: Florida Atlantic University 조교수  
1988년~1994년: 포항 방사광 가속기 저장링 개발 단장  
1987년~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 부교수, 교수  
1995년~현재: MARC(국방부 및 국방과학연구소 지정 전자파 특화 연구센터) 원격탐사 연구실 실장  
[주 관심분야] 레이더 시스템, 원격탐사, SAR, EMI/EMC