

# 레이다 공간급전용 다중-개구 송신 혼 안테나

## The Multi-Aperture Transmit Horn Antenna for Radar Space Feeder

조 용 문\*  
Cho, Yong-Moon

박 동 철\*\*  
Park, Dong-Chul

### ABSTRACT

In this paper, the transmit antenna for the space feeder used for the phased array antennas is investigated. The multi-aperture horn antenna is proposed as the transmit antenna and the characteristics are verified with the Matlab coding, HFSS of Ansoft Corp., and MWS of CST Corp.. The E-plane and H-plane beam patterns of the multi-aperture horn antenna are nearly symmetrical and the sidelobe level of the E-plane beam pattern is lower than that of general pyramidal horn antenna. The fabricated multi-aperture horn antenna is measured using the near-field measurement system. The measured results show good agreement with the simulated ones.

주요기술용어 : Multi-Aperture Horn Antenna(다중-개구 혼 안테나), Space Feeder(공간급전기), Phased Array Antenna(위상배열 안테나), Transmit Antenna(송신 안테나)

### 1. 서 론

위상배열 안테나를 이용한 다기능 레이다는 중거리 유도 무기체계의 주요 센서로서 넓은 공간을 빠른 속도로 탐색하여 다수의 표적과 유도탄 등을 탐지, 추적하여야 한다. 그러므로, 이러한 체계에서 위상배열 안테나의 제반 전자파적 특성, 즉 복사 패턴, 빔조향 성능 및 정밀도 등은 다기능 레이다 뿐만 아니라 이를

이용한 무기체계의 전체적인 성능에 결정적인 영향을 미친다.

위상배열 안테나에 적합한 급전 방식으로는 패쇄급전 방식이 있다. 그러나, 이 패쇄급전 방식은 다수의 결합기와 전송선을 필요로하기 때문에 삽입 손실이 크고, 임피던스 정합이 어려우며 과도한 제작비용을 필요로 하는 등의 단점을 가지고 있다. 더구나 위상배열 안테나의 복사 소자수가 굉장히 많은 요즘에는 이러한 급전 방식을 사용하는 데는 무리가 있다. 따라서 급전용 송신 안테나를 사용하는 공간급전 방식은 위상배열 안테나에 전파를 공급하는 가장 경제적인 방

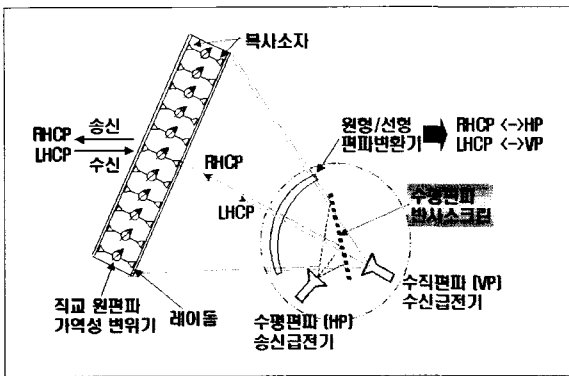
\* 충남대학교 전파공학과 대학원 석사과정

\*\* 충남대학교 전파공학과 교수

식이라 할 수 있다. 그러나 고성능의 급전기가 되기 위해서는 부엽 레벨과 스피로버(spillover)를 일정 수준 이하로 낮게 해주어야 하는 어려움이 있다<sup>[1]</sup>.

원형편파 모노펄스 공간급전기는 다기능 레이더용 수동 위상배열 안테나의 성능을 결정하는 중요한 구성품 중 하나로서, 송신기에 공급되는 전파를 수동 위상배열 안테나의 배열 소자로 송신하고, 또한 모노펄스 급전기로 수신한다. 이러한 공간급전기는 안테나 운용개념(변위기의 종류, 송수신의 차단도, 사용편파 등)에 따라 송신과 수신이 분리 또는 통합되는 방식을 적용하게 된다<sup>[2]</sup>. 그림 1은 송수신이 분리된 다기능 레이더의 공간급전기 개념도를 보여주고 있다.

그림 1과 같은 공간급전기의 송신 안테나로는 혼 안테나가 많이 쓰이는데 일반 피라미달 혼 안테나의 경우에 H면으로는 cosine의 개구면 전계 분포를 가져 비교적 양호한 패턴을 가질 수 있지만, E면에 대해서는 균일한 개구면 전계 분포를 가져 부엽 레벨이 비교적 높은 특성을 나타낸다. 또한 H면과 E면의 개구면 전계 분포가 다르기 때문에 빔 패턴의 대칭성이 유지되지 않는다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 E면에 수직인 여러 개의 격벽을 삽입한 다중-개구 혼(multi-aperture horn)방식, 하나의 혼에



[그림 1] 다기능 레이더 공간급전기의 개념도

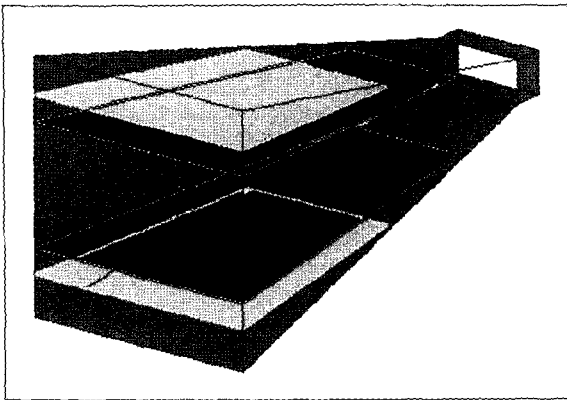
계단이나 불연속을 삽입하여 필요한 고차모드를 발생시켜 개구면 필드 분포를 조절하는 다중 모드 혼(multi-mode horn) 방식, 그리고 하나 또는 여러 개의 모드를 이용하되 도파관의 E면에 주름(corrugation) 등 높은 임피던스를 구현해서 모드 분포 자체를 조절하는 하이브리드 모드 혼(hybrid-mode horn)방식이 있다.

본 논문에서는 E면에 수직인 4개의 격벽을 사용하여 E면의 개구면 전계 분포를 H면의 개구면 전계 분포인 cosine 형태와 유사한 계단형의 cosine 분포를 갖게 하는 다중-개구 혼 안테나를 제안하였다. 제안된 X 밴드 대역에서 사용되는 안테나의 복사 패턴을 Matlab을 이용해서 계산해 보고, 상용 시뮬레이션 툴인 HFSS를 이용하여 해석하고, 실제 제작하여 측정된 결과를 비교하여 그 특성을 확인하였다

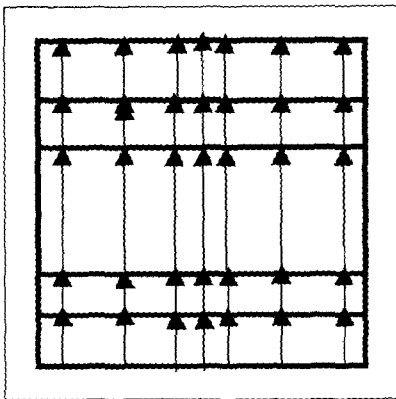
## 2. 다중-개구 혼 안테나 이론

선형편파 공간급전기는 기본적으로 구형 도파관의 모드를 사용하므로, H면에 대해서는 cosine의 개구면 전계 분포를 갖기 때문에 비교적 양호한 패턴을 가질 수 있지만, E면에 대해서는 균일한 개구면 전계 분포를 갖기 때문에 부엽 레벨이 높은 복사 패턴을 갖는다. 따라서 그림 2와 같이 피라미달 혼 안테나의 E면에 수직인 격벽을 삽입하여 E면의 개구면 전계 분포를 cosine에 가까운 계단형으로 만들어 줄 수 있다. 그림 2는 E면에 수직으로 4개의 격벽을 삽입한 다섯 개의 개구면을 갖는 다중-개구 혼 안테나를 보이고 있다.

구형 도파관 기본 모드( $TE_{10}$ )의 차단 주파수는 도파관의 높이에 대해서는 무관하다. 그리고 구형 도파



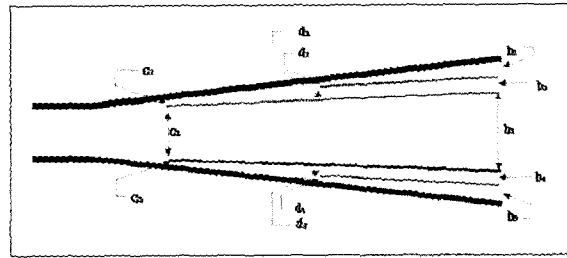
[그림 2] 다중-개구 혼 안테나



[그림 3] 다중-개구 혼의 개구면 전계 분포

관은 E면에 균일한 전계 분포를 가지고 있으므로 E면에 수직인 격벽을 삽입할 경우 도파관의 차단 주파수는 변화하지 않고 각각의 격벽으로 나누어진 곳으로 진행되는 에너지는 격벽으로 나누어진 간격의 비와 같게 된다. 따라서 다중-개구 혼의 격벽의 간격을 조절하면 개구면의 전계의 세기를 조절할 수 있다.

그림 3은 다중-개구 혼 안테나의 개구면 전계 분포를 나타내고 있다. 격벽에 의해 나누어진 각각의 개구면에는 E면에 균일한 전계가 서로 다른 크기를 가지고 있으므로 전체적인 개구면에서 E면은 계단형의 전계 분포를 갖는다.



[그림 4] 다중-개구 혼의 격벽 사이의 간격

### 2.1 다중-개구 혼의 개구면 간격

다중-개구 혼 안테나의 개구면의 전계 세기는 격벽의 간격에 관계되기 때문에 격벽의 간격을 조절해 주면 개구면의 전계 분포에 변화를 줄 수 있다. 그림 4는 다중-개구 혼 안테나의 격벽 사이의 간격을 나타내고 있다.

그림 4에서 다중-개구 혼 안테나의 격벽으로 나뉘어진 부분을 근사적으로 살펴보면 E면 전계분배기와 같은 형태를 띤다. 따라서 나뉘어진 간격에 비례하여 전력이 진행하므로 최종 개구면의 전력을  $E_1^2, E_2^2, E_3^2, E_4^2, E_5^2$ 으로 나타내면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_1^2 = \frac{c_1 d_1}{(c_1 + c_2 + c_3)(d_1 + d_2) b_1} \quad (1-a)$$

$$E_2^2 = \frac{c_1 d_2}{(c_1 + c_2 + c_3)(d_1 + d_2) b_2} \quad (1-b)$$

$$E_3^2 = \frac{c_2}{(c_1 + c_2 + c_3) b_3} \quad (1-c)$$

$$E_5^2 = E_1^2 \quad (1-d)$$

$$E_4^2 = E_2^2 \quad (1-e)$$

대칭적인 구조이므로 첫 번째와 다섯 번째, 두 번째와 네 번째의 개구면을 통과하는 전력은 같다.

개구면의 전계의 값은 에너지의 값에 제곱근을 취해

주면 되므로, 세 번째 개구면의 전계값으로 정규화 하여 주면 격벽에 의해 나뉘어진 간격과 개구면의 전계 분포와의 관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_1 = \sqrt{\frac{c_1 d_1 b_3}{c_2 (d_1 + d_2) b_1}} \quad (2-a)$$

$$E_2 = \sqrt{\frac{c_1 d_2 b_3}{c_2 (d_1 + d_2) b_2}} \quad (2-b)$$

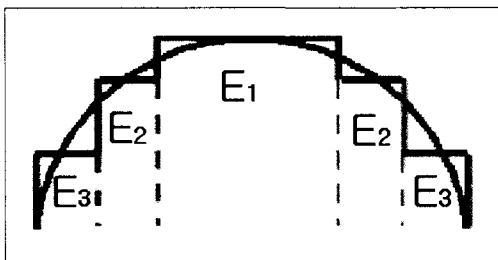
$$E_3 = 1 \quad (2-c)$$

$$E_5 = E_1 \quad (2-d)$$

$$E_4 = E_2 \quad (2-e)$$

따라서 다중-개구 혼의 안테나를 설계하기 위해서는 식 (2)를 사용하면 된다. 만약 최종 개구면의 간격을 11.2 : 7.6 : 35.5 : 7.6 : 11.2로 결정하였다면 cosine 분포 곡선에 대해 각각의 개구면 간격만큼의 넓이를 적분을 취하여, 그 넓이를 개구면의 간격과 높이로 결정하여 주면 계단형의 cosine 형태의 전계 분포를 구할 수 있다. 이렇게 하여 결정된 전계의 세기가 그림 5에 나타나 있다.

그림 5와 같이 된 경우 식 (2)를 통하여 E면의 계단형 cosine 전계 값을 계산하면  $E_1=0.283$ ,  $E_2=0.65$ ,  $E_3=1$ 이 된다.

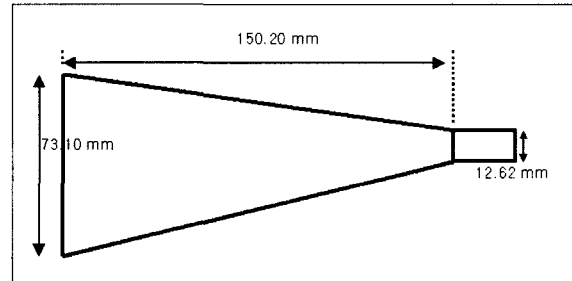


[그림 5] 계단형 cosine 전계 분포

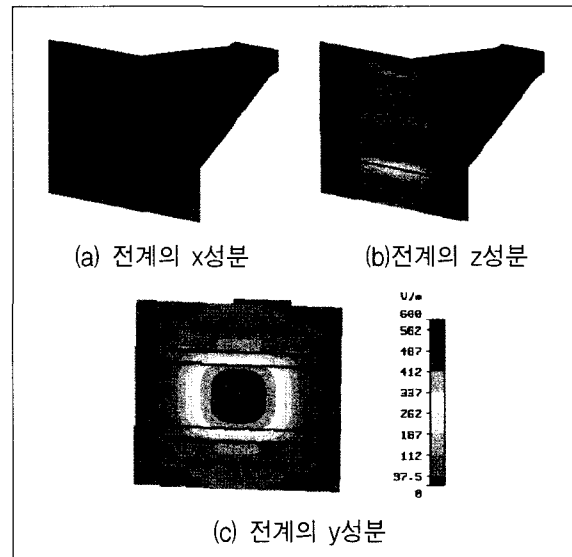
## 2.2 다중-개구 혼의 개구면 전계 성분

다중-개구 혼 안테나도 일반적인 피라미달

혼 안테나와 같이 입력되는 도파관에서 최종 개구면까지의 벌어진 각도에 의해 개구면의 전계 성분이 y성분만이 아닌 z성분도 나타날 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제안한 다중-개구 혼 안테나에서는 벌어진 각도가 적기 때문에 전계의 y성분만 존재하는 것으로 가정하여 근사적으로 계산하여도 복사 패턴에 영향을 주지 않는다. 그림 6에서 제안된 다중-개구 혼 안테나의 측면도를 보여주고 있다.



[그림 6] 제안된 다중-개구 혼의 측면도



[그림 7] 다중-개구 혼의 개구면 전계 성분

그림 6은 E면의 벌어진 크기 차이를 보여준다. 제안된 다중-개구 혼 안테나는 E면으로 약 11.4°, H면으로 약 8.6°정도가 벌어져 있다. 따라서 벌어지는 정도가 작기 때문에 그로인해 생기는 전계의 z성분은 무시할 수 있다. 그 결과를 CST사의 MWS(micro wave studio) 상용 툴을 사용하여 확인하여 보았다. 그 결과가 그림 7에 나타나 있다.

그림 7에서 보여주는 다중-개구 혼 안테나는 입사되는 전계가 Ey 성분을 가지고 입사되고 있고, E면에 대해 수직인 4개의 격벽이 삽입되어 있는 형태를 띄고 있고 전파의 진행방향은 z방향이다. 이때 최종 개구면에서의 전계의 성분을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 개구면의 전계의 y성분이 전체의 전계의 분포를 특성지움을 알 수 있다. 또한 전체적인 개구면 살펴보면 E면과 H면의 전계 분포가 유사함을 알 수 있고 이로 인해, 양호한 복사 패턴을 보일 것을 예상할 수 있다.

### 2.3 다중-개구 혼의 복사 패턴

일반적으로 개구면 안테나의 복사 패턴을 구하는 방법은 개구면의 필드를 이용해 등가의 전류 소스를 구하고, 전류 소스로부터 벡터 포텐셜을 구한 후, 그로부터 야기되는 원거리의 필드 값을 계산하여 원거리의 복사 패턴을 구하게 된다<sup>[3,4]</sup>. 다중-개구 혼 안테나도 같은 방법으로 원거리 복사 패턴을 구할 수 있다. 단지 개구면이 다섯 개가 존재하기 때문에 각각의 개구면에 앞에서 계산된 전계 크기의 Ey 값이 존재한다고 가정하고 각각의 개구면에 대한 원거리 복사 패턴의 결과를 합하여 주면 된다. 전체적인 개구면의 가로 크기가  $-a/2 \sim a/2$ 이고, 각각의 개구면의 세로의 크기가  $b_3 \sim b_2, b_2 \sim b_1, b_1 \sim -b_1, -b_1 \sim -b_2, -b_2 \sim -b_3$ 라고 하고 원거리에서의 전체 전계의 값을 구하면 식

(3)과 같다.

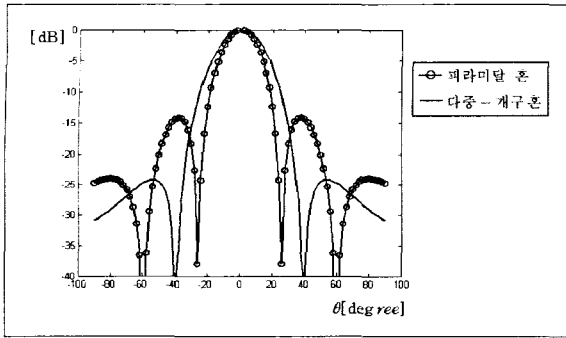
$$E_r = 0 \quad (3-a)$$

$$E_\theta = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left[ 2\sin\phi \left[ \frac{\pi}{2} a \left( \frac{\cos X}{X^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right) \right] \right] \\ \times \left[ E_1 \frac{\sin Yb_1}{Y} + E_2 \left( \frac{\sin Yb_2}{Y} - \frac{\sin Yb_1}{Y} \right) \right. \\ \left. + E_3 \left( \frac{\sin Yb_3}{Y} - \frac{\sin Yb_2}{Y} \right) \right] (1 + \cos\theta) \quad (3-b)$$

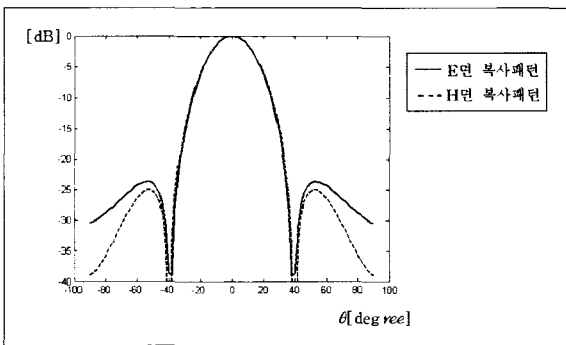
$$E_\phi = -\frac{jke^{-jkr}}{4\pi r} \left[ 2\cos\phi \left[ \frac{\pi}{2} a \left( \frac{\cos X}{X^2 - \left(\frac{\pi}{2}\right)^2} \right) \right] \right] \\ \times \left[ E_1 \frac{\sin Yb_1}{Y} + E_2 \left( \frac{\sin Yb_2}{Y} - \frac{\sin Yb_1}{Y} \right) \right. \\ \left. + E_3 \left( \frac{\sin Yb_3}{Y} - \frac{\sin Yb_2}{Y} \right) \right] (1 + \cos\theta) \quad (3-c)$$

여기서  $X = \frac{ka}{2} \sin\theta \cos\phi, Y = k \sin\theta \sin\phi$  이다. 식 (3)에서 구한 원거리 전계값을 Matlab을 이용하여 계산하면 원거리의 복사 패턴을 구할 수 있다.

그림 8은 전체적인 개구면의 크기가 같은 일반 피라미달 혼 안테나와 다중-개구 혼 안테나의 E면의 원거리 복사 패턴을 Matlab을 이용하여 계산한 결과이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 일반 피라미달 혼 안테나에 비해 다중-개구 혼 안테나의 부엽 레벨이 훨씬 낮다. 다중-개구 혼 안테나의 E면의 복사 패턴의 부엽 레벨은 약 -25dB로 공간급전기의 송신 안테나에서 요구하는 낮은 부엽 레벨을 만족함을 알 수 있다. 또한 다중-개구 혼 안테나의 주빔폭이 피라미달 혼 안테나의 주빔폭 보다 넓음을 알 수 있다.



[그림 8] 피라미달 혼과 다중-개구 혼의 E 면 복사 패턴

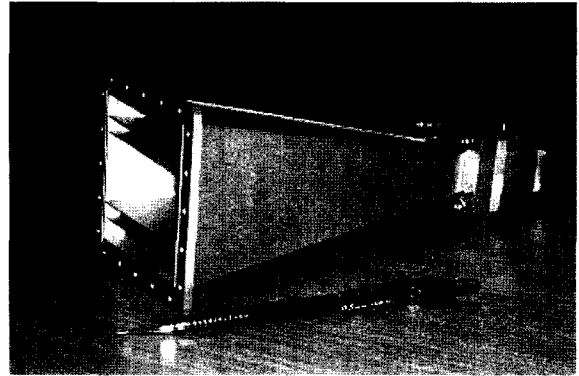


[그림 9] 다중-개구 혼의 E면과 H면의 복사 패턴

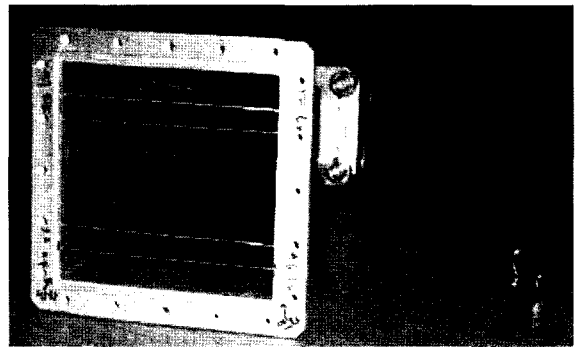
그림 9는 다중-개구 혼 안테나의 E면과 H면의 복사 패턴을 보여준다. 주빔의 형태는 서로 거의 동일함을 보이고 있고, 부엽 레벨에서는 약 2dB 정도의 차이를 보이고 있지만 전체적으로 다중-개구 혼 안테나의 E면과 H면의 복사 패턴은 유사하다고 할 수 있다. 부엽레벨 쪽에서의 약간을 차이는 다중-개구 혼 안테나의 개구면에서의 E면의 전계 분포가 H면의 전계 분포인 cosine 곡선에 가깝지만 정확한 cosine 형태가 아닌 그에 근접한 계단형을 띄고 있기 때문에 생기게 된다. 위상배열 안테나의 복사 소자가 원형편파로 작동하기 위해서는 공간급전기의 송신 안테나의 복사 패턴은 E면과 H면이 서로 대칭적이이어야 하는데 이를 잘 만족하고 있다.

### 3. 측정 및 고찰

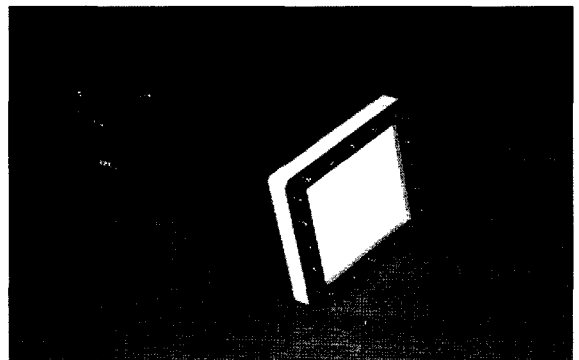
그림 10은 제작된 다중-개구 혼 안테나를 보여준다.



(a) 측면도



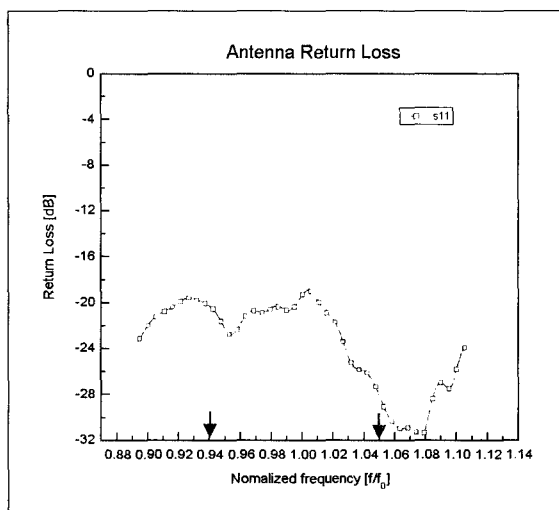
(b) 개구면 정면도



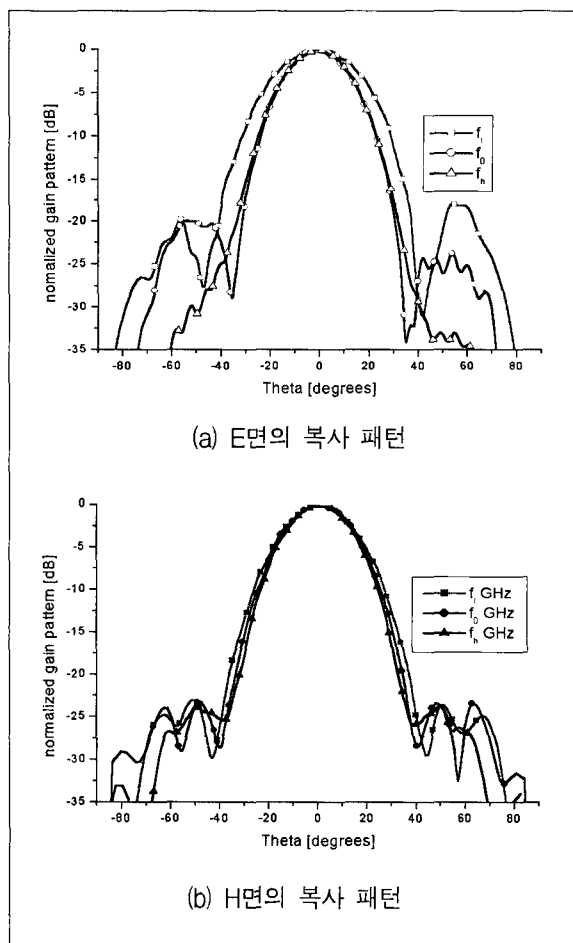
(c) 레이돔이 씌워진 형태

[그림 10] 제작된 다중-개구 혼 안테나

그림 10은 X 밴드 대역에서 사용하는 공간 급전기의 송신 안테나로 사용되는 다중-개구 혼 안테나로 피라미달 혼의 E면에 수직인 격벽을 4개 삽입하여 다섯 개의 개구면을 만들어준 형태이다. (a)는 측정을 위한 동축 케이블과 WR112 도파관을 변환시켜주는 변환기가 장착된 전체적인 모습을 보여준다. 그리고, (b)는 다중-개구 혼 안테나의 최종 개구면의 형태를 보여준다. 제작 방법은 그림에서 보는 바와 같이 피라미달 혼의 벽면에 홈을 만든 후 그 틈새에 격벽을 끼워 넣고 접착시키는 방법을 사용하였다. (c)는 다중-



[그림 12] 측정된 다중-개구 혼의 반사 손실



[그림 11] 제작된 다중-개구 혼의 복사 패턴

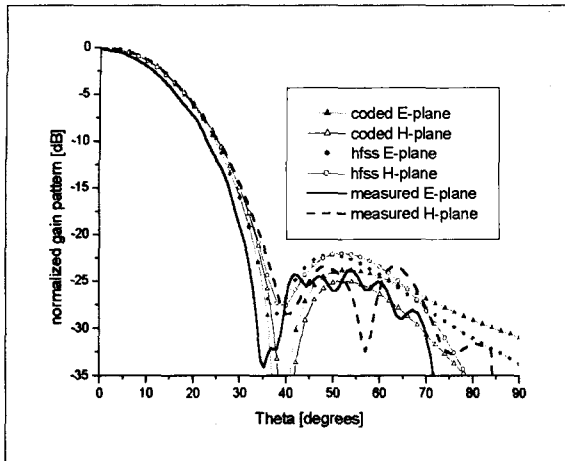
개구 안테나의 최종 개구면 앞에 레이돔을 씌운 형태를 보여준다. 레이돔의 두께는 사용주파수에서 반파장을 유지하여 그 특성이 공기중에서와 변화가 없게 유지하였다. 그리고, 전체적인 다중-개구 혼 안테나의 측정은 근접 전계 측정 시스템을 사용하였다.

그림 11은 사용 주파수에 따른 E면과 H면의 복사 패턴의 측정 결과이다.

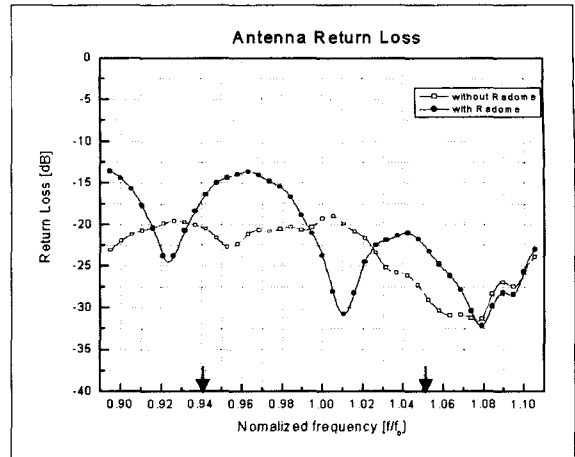
모든 주파수에서 주빔과 부엽 레벨의 차이가 약 20 dB 이상 나는 것을 볼 수 있다. 일반 피라미달 혼 안테나에서의 E면의 주빔과 부엽 레벨의 차이보다 약 7dB 이상 크기 때문에 소기의 목적은 충분히 달성되었다.

그림 12는 중심 주파수로 정규화된 측정된 반사 손실을 나타내고 있으며, 사용 주파수 대역에서 16dB 이상으로 임피던스 정합이 매우 양호함을 보인다.

그림 13은 다중-개구 혼 안테나의 복사 패턴을 Matlab을 이용하여 계산한 결과와 상용 시뮬레이션 툴인 HFSS를 이용하여 해석한 결과<sup>[5]</sup>, 제작 측정된 결과를 비교한 그림이다. 여섯 개의 그래프를 살펴보면



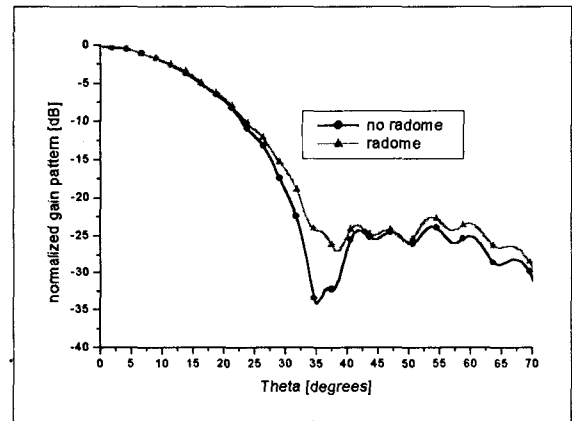
[그림 13] 다중-개구 혼 복사 패턴 비교



[그림 14] 레이돔에 의한 반사 손실 변화 비교

전체적으로 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 부엽 레벨은 약 -24dB로 공간급전기의 송신 안테나로 사용하기에 충분하며, -10dB 빔 폭은 약 50°, 부엽이 나타나는 위치는 ±50° 정도이다. 그리고, 주빔의 형태가 거의 같으므로 E면과 H면의 복사 패턴이 서로 대칭을 이룸을 알 수 있다.

따라서, 다중-개구 혼 안테나의 공간급전기의 송신 안테나로 사용하기에 그 특성이 충분히 만족됨을 알 수 있다. Matlab을 이용하여 계산된 복사 패턴과 시뮬레이션 툴인 HFSS를 사용하여 해석된 결과를 보면 거의 유사함을 알 수 있다. 따라서 앞에서 보였던 방법을 이용하면 보다 빠르게 다중-개구 혼 안테나의 복사 패턴을 알 수 있다. 그리고 그림 13에 나와있는 그래프 중 측정된 E면 패턴이 가장 차이가 남을 보이는데 그 이유는 다중-개구 혼 안테나의 내부 격벽의 간격을 정확히 유지하여야 개구면에서 전계 분포가 유지될 수 있는데 제작상의 오차로 인해 내부 격벽의 간격이 유지되지 못하고, 그로 인해 개구면 전계 분포가 cosine형보다 펄스형태에 가까운 계단형태를 띄었기 때문이다.



[그림 15] 레이돔에 의한 복사 패턴 변화

그림 14는 중심 주파수로 정규화된 레이돔이 씌워진 경우의 측정된 반사 손실을 나타내고 있다. 개구면 앞에 레이돔을 씌움으로써 전체적인 임피던스가 변하기 때문에 반사 손실 결과도 변한다. 하지만 사용 주파수 대역에서 약 13dB 이상으로 임피던스 정합은 레이돔에 의해 나빠지기는 했지만 그래도 양호함을 보인다.

그림 15는 레이돔에 의한 복사 패턴의 변화를 나타낸다



레이돔을 씌우지 않은 경우와 레이돔을 씌운 경우에 대한 E면의 복사 패턴을 나타낸다. 레이돔은 공기 중에 안테나가 놓여 있는 경우와 동일한 조건이 되게 유전율이 2.2인 테프론을 사용하여 설계하였다. 부엽 레벨은 거의 변화가 없이 약 -25dB 정도를 나타낸다. 주 빔의 패턴도 거의 유사함을 알 수 있다. 널 점의 레벨에서 약간의 차이가 나지만 이는 전체적인 특성에서 무시 될 만하다. 따라서 레이돔에 의해서는 복사 패턴의 변화는 적다고 볼 수 있다.

또한 다중-개구 혼 안테나의 이득은 중심 주파수에서 약 16.27dBi이고, 레이돔을 씌웠을 경우 약 15.9 dBi로 나타났다. 레이돔에 의해 약간의 이득 변화가 있으나 이 또한 무시할 만하고, 전체적으로 고 이득을 가진 공간급전기의 송신 안테나로서 만족할만한 특성을 보인다.

#### 4. 결 론

위상배열 안테나의 공간급전기에 송신 안테나로 사용되는 다중-개구 혼 안테나의 특성에 대해 고찰해 보았다. 일반 피리미달 혼의 균일한 E면에 수직인 격벽을 삽입하여 E면의 개구면 전개 분포를 H면의 개구면 전개 분포인 cosine 형태와 유사한 계단형의 cosine 분포로 바꾸어 주어 부엽 레벨을 만족스럽게 낮출 수 있었고, E면과 H면의 복사 패턴을 유사하게

유지할 수 있었다.

X 밴드 대역에서 사용하는 다중-개구 혼을 제작 측정하여 그 특성을 살펴본 결과 사용 목적에 부합하는 낮은 부엽 레벨, E면과 H면의 대칭적인 복사 패턴을 보였다. 따라서 본 논문에서 제시한 다중-개구 혼 안테나는 위상배열 안테나의 공간급전기 중 선형편파 송신 안테나로 사용할 경우 우수한 성능을 보일 수 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Byron Edde, *Radar Principles, Technology, Applications*, Prentice Hall, 1995.
- [2] B. A. Bounkin and A. A. Lemanski, "Experience of development and industrial production of X-band passive phased antenna array," *IEEE International Radar Conference*, pp.115~119, 1994.
- [3] A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, chaps. 12~13, John Wiley and Sons, 1997.
- [4] Richard C. Johnson, *Antenna Engineering Handbook*, McGraw-Hill Book Company, 1985.
- [5] Ansoft HFSS, ver. 8.5, Ansoft Corp., www.ansoft.com. 2002.