초고출력 안테나 시스템 급전용 다중 모드 혼 안테나 설계에 관한 연구

A Study on Design of Multimode Feed Horn Antenna for High Power Microwave Antenna System

이상흔 · 윤영중 · 이병무* · 소준호**

Sang Heun Lee · Young Joong Yoon · Byoung Moo Lee* · Joonho So**

요 약

본 논문에서는 초고출력 안테나 시스템의 급전용 다중 모드 혼 안테나를 제안한다. 제안된 초고출력용 급전 혼 안테나는 모드 변환기와 연결되며, 전원부와 반사판 안테나의 사이에 위치한다. 초고출력 시스템의 경우 급전 안테나의 spillover를 고려한 −25 dB 빔 폭이 반사판 안테나의 크기를 결정하므로 반사판 안테나의 소형화를 위해 −25 dB 빔 폭을 줄인 급전용 다중 모드 혼 안테나를 설계 및 제작하였다. 그 결과 제안된 다중 모드 혼 안테나를 이용한 급전 시스템의 이득은 27 dBi이며 반사 손실은 10 GHz에서 −22 dB 이하의 값이 측정되었다. 또한 −25 dB 빔 폭은 수직 평면과 수평 평면에서 각각 20.24°와 28.92°로 측정되었고 이는 기존의 혼 안테나를 이용한 급전 시스템의 빔 폭보다 약 10° 가량 작은 값으로, 제안된 혼 안테나는 초고출력 안테나 시스템 소형화에 적합한 형태임을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a multimode feed horn antenna is suggested for a high power microwave(HPM) antenna system. The proposed HPM feed horn antenna which is connected with a mode converter is located between source and reflector antenna. A multimode feed horn antenna which has reduced −25 dB beamwidth is designed and fabricated for miniaturization of reflector antenna because −25 dB beamwidth which is determined by considering spillover of feed horn antenna decides a size of reflector in case of HPM. As a result, feed system which uses the multimode feed horn antenna has high gain about 27 dBi and return loss is less than −22 dB at 10 GHz. The measured −25 dB beamwidths of the radiation pattern at vertical, horizontal-plane equal to 20.24°, 28.92° which is less than about 10° beamwidth of conventional feed system. Thus the suggested feed horn antenna is suitable to feed horn for miniaturization of HPM antenna system.

Key words : Multimode, Horn, Breakdown Phenomenon, High Power System

Ⅰ. 서 론

초고출력 안테나 시스템은 태양 전지를 이용한 위성 발전소에 사용되거나 지상에서 비행기 등에

「본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구 센터 지원사업의 연구 결과로 수행되었음(IITA-2005-C1090-0502-0012).」

연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electric and Electronic Engineering, Yonsei University)

*삼성전자 정보통신총괄(Telecommunication Network Business, Samsung Electronics)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논 문 번 호 : 20060405-035

· 수정완료일자 : 2006년 5월 12일

직접 마이크로파 에너지를 공급하는 무선 전력 전송(WPT: Wireless Power Transfer), 지하 탐사 레이더(GPR: Ground Penerating Rador) 혹은 장거리 고정 무선 통신 등에서 사용될 수 있다. 또한 살균이나 포장 등의 목적으로 상업용, 의학용의 마이크로파 가열 시스템으로 상용화 될 수 있다.

이러한 초고출력 무선 전송 시스템에서는 도파관, 혼 안테나의 개구면 등에서의 정전 파괴를 반드시 고려하여야 한다. 정전 파괴 현상이 일어나면 신호 전송이 불가능할 뿐만 아니라 반사된 신호에 의해 전원부에 심각한 손상을 야기한다. 따라서, 정전 파괴가 발생하지 않도록 도파관의 크기 및 혼 안테나의 개구 크기를 설정하여야 하며, 자유 공간에서의 RF 정전 파괴 및 도체의 표면 정전 파괴에 대한 고찰이 필요하다. 일반적으로 자유 공간에서 전자기파의 정전 파괴 현상이 발생하는 최소 전계 값의 1/3이 되는(안전도 3) 전계가 개구 안테나의 개구상에 여기되도록 하는 것이 일반적이다[1]. 따라서 이와 같은 기준을 만족하는 최대 이득의 원형 혼 안테나를 설계하여 HPM 급전 시스템으로 사용한다[2]. 하지만 이러한 원형 혼 안테나를 사용할 경우 spillover를 고려한 반사판의 크기가 매우 커지므로 안테나 시스템의 소형화 방안에 대한 급전 시스템에 관한 연구가 필요하다.

그러므로, 본 논문에서는 먼저 초고출력 안테나 시스템의 구조를 살펴보고 100 MW의 입력 전력에서 효율적이고 안전한 방사를 위하여 우선적으로 3 cm의 파장과 100 ns의 펄스 폭을 갖는 RF 신호에서 정전 파괴를 일으키지 않는 혼 안테나의 개구 반지름을 설정한다. 이후에 기존의 혼 안테나와 동일한 수준의 이득을 가지면서 원치 않는 방향으로 방사되는 에너지 수준을 낮추기 위해 −25 dB 빔 폭을 줄인 다중 모드 혼 안테나를 모드 변환기의 출력을 고려하여 설계하고 제작하여 그 특성을 고찰한다.

Ⅱ. 초고출력 원형 혼 안테나의 설계

2-1 초고출력 안테나 시스템의 구조

초고출력 안테나 시스템은 모드 변환기, 급전 혼 안테나, 반사판 안테나로 구성된다. 이때 모드 변환기의 입력은 초고출력용 전원부의 출력에 해당한다. 초고출력 마이크로파 시스템의 전원부는 일반적으로 TM_{01} 단일 모드를 출력하는 상대론적 후진파 발진기(RBWO)를 사용한다. 이러한 TM_{01} 모드는 직접 방사시 도우넛 형태의 패턴을 가지게 되어 이득이 감소하고 안테나 지향 방향으로 에너지를 집중할 수 없게 된다. 따라서 모드 변환기를 통해 TM_{01} 모드에서 TE_{11} 모드로 변환하게 되고 이러한 모드 변환기의 출력은 혼 안테나의 입력이 되어 초고출력의 마이크로파를 반사판을 향해 방사하게 된다. 모드 변환기와 혼 안테나는 함께 급전 시스템을 구성하고 이러한 급전 시스템의 방사 패턴이 전체 초고출력용 안테나 시스템의 크기의 중요한 결정 요소가 된다. 안테나 시스템의 구성은 그림 1에 나타나 있다.

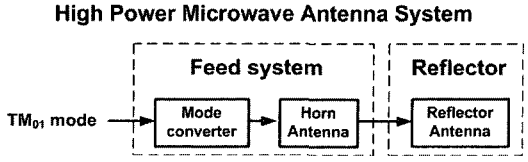


그림 1. 초고출력 안테나 시스템의 구성
Fig. 1. The component of high power microwave antenna system.

급전 시스템은 초고출력의 마이크로파를 전송하는 과정에서 정전 파괴 현상을 방지해야 한다. 정전 파괴 현상은 기압이 높을수록, 입력 전원 펄스의 폭이 클수록, 주파수가 낮을수록 잘 일어나게 된다. 입력 전원의 펄스폭과 주파수의 크기는 전원부에 의해 결정되는 요소로 일반적으로 정전 파괴 현상을 방지하기 위해서는 기압을 낮추는 진공 처리 방식을 사용하게 된다. 따라서 정전 파괴 현상을 방지하기 위해 초고출력 시스템에서는 전송되는 도파관과 모드 변환기, 혼 안테나의 내부를 진공 처리하는 과정이 필요하다. 이러한 내부의 진공 특성은 혼 안테나의 개구면에 RF 윈도우를 사용함으로써 얻을 수 있고 그 형태는 그림 2와 같이 구성된다.

개구면의 RF 윈도우는 혼 안테나 내부를 진공으로 만들기 위해 반드시 필요하지만, 이로 인한 반사파가 발생한다. 이때 반사파를 최소화시키기 위해서는 RF 윈도우 두께를 $\lambda_g/2$로 설정하여야 한다.

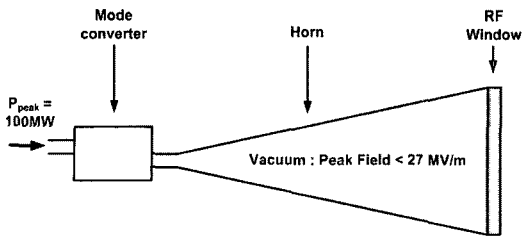


그림 2. 초고출력 안테나 시스템의 급전 구조
Fig. 2. The feed structure of high power microwave antenna system.

또한 RF 윈도우의 재질로는 내구성이 우수하며 온도 및 압력에 따른 특성 변화가 적은 합성 수지가 적합하며 특히 폴리카보네이트라는 물질은 RF 주파수에 따른 특성 변화도 적기 때문에 적합한 윈도우 물질로 사용될 수 있다.

2-2 초고출력 원형 혼 안테나의 설계

급전 시스템의 내부 정전 파괴 현상은 2-1에서와 같이 RF 윈도우를 사용함으로써 방지할 수 있다. 이때 혼 안테나의 개구면에서 공기 중으로 방사될 때의 정전 파괴 현상도 고려해야 하는데 이는 공기 중의 정전 파괴 값보다 작은 전계가 개구면에 걸릴 수 있도록 개구 크기를 키워주는 것으로 방지할 수 있다. 먼저 공기중의 정전 파괴 현상이 일어나는 전계값을 구하는 과정이 필요한데 이 값은 파장이 3 cm, 펄스폭이 100 ns, 그리고 표준대기압이 1 atm인 경우에 3.78 MV/m가 된다[2]. 따라서 자유 공간으로 초고출력의 마이크로파 에너지가 전파할 경우 이보다 낮은 전계에서 동작하도록 혼 안테나의 개구를 설정해야 한다.

혼 안테나의 개구면에 걸리는 전계의 세기를 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 TE_{11} 모드일 경우에 도파관 내에 최대 전계의 크기는 다음과 같은 식으로 나타난다[1].

$$E_{W/G_{peak}} = \sqrt{\frac{2P_{peak}Z_{TE_{11}}}{r}} \quad [\mathrm{V/m}] \tag{1}$$

여기서, $Z_{TE_{11}} = \eta_0 \frac{k}{\sqrt{k^2 - k_c^2}}$, $k_c = \frac{P'_{mn}}{r}$, P'_{11} =1.841이다.

이때, 100 MW를 입력하면 E_{W/G_peak}는 약 10.59 MV/m가 된다. 이것을 바탕으로 식 (2)에 의해 혼 안테나의 개구에서 최대 전계를 계산할 수 있다. 이때 도파관의 면적이 A이고 안테나 개구면적이 A'이다.

$$E_{horn-exit_{peak}} = E_{W/G_{peak}} \sqrt{\frac{A}{A'}} \tag{2}$$

입력 전력의 값이 100 MW일 때 개구면에서 정전 파괴가 일어나지 않으려면 $E_{horn-exit_{peak}}$ 값이 3.78 MW/m보다 작도록 개구 크기인 A'과 개구 반지름인 r'을 결정해야 한다. 이러한 사양을 고려하여 안전도 3을 고려한 r'의 값을 구하면 140 mm 이상이 되어 최대 이득의 원형 혼 안테나를 설계하면 그림 3과 같은 형태를 얻을 수 있다[2],[3].

2-3 초고출력 원형 혼 안테나의 방사 특성

그림 3과 같은 개구 정전 파괴를 고려한 최대 이득의 원형 혼 안테나는 모드 변환기와 연결되어 급전 시스템을 구성한다. 이때 모드 변환기는 변환 효율이 높으며 정전 파괴에도 견딜 수 있는 곡선형 직접 변환 방식의 모드 변환기를 사용한다[4]. 이렇게 구성된 급전 시스템에 TM_{01} 모드의 입력을 인가하면 약 95 %의 TE_{11} 모드가 발생하며 그 이외에 고차모드인 TM_{01} 모드, 그리고 TE_{21} 모드가 함께 발생하게 된다. 모드 변환기와 혼 안테나를 연결한 급전 시스템에 TM_{01} 모드를 인가한 시뮬레이션 수행 결과 반사 손실은 −24.82 dB, 이득은 27.29 dBi의 값을 얻었다. 시뮬레이션은 CST사의 MICROWAVE STUDIO™ 시뮬레이터를 이용하여 수행하였고, 급전 안테나의 빔 폭은 반사판 안테나의 spillover를 고려한 −25 dB 빔 폭을 기준으로 하여 그 값을 구하였다. 그 결과 수직 평면이 37.4°, 수평 평면이 29.78°가 되어 반사판 안테나의 부반사판은 가장자리 조사 수

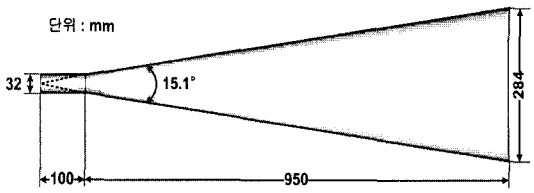


그림 3. 초고출력 원형 혼 안테나의 단면도
Fig. 3. Sectional view of circular horn antenna for high power microwave.

준을 −25 dB로 하기 위해 38°의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 함을 확인하였다.

Ⅲ. 초고출력 다중 모드 혼 안테나의 설계

3-1 다중 모드 혼 안테나

앞 절에서는 초고출력용 급전 안테나로 사용하기 위해 설계한 원형 혼 안테나에 대해 분석해 보았다. 그러나 이 경우 수직 평면의 부엽 레벨이 높아져서 전체적인 −25 dB 빔 폭이 증가하게 되므로 반사판 안테나의 크기가 커지는 단점이 발생한다. 이를 극복하기 위해서는 높은 이득을 유지하면서 부엽 레벨을 줄여 −25 dB 빔 폭을 감소시킨 급전 안테나가 필요하다. 이렇게 방사 패턴을 조절하기 위해 개구면에서 형성되는 모드의 비율을 조절하여 개구 전계 분포의 세기를 조절하는 방법을 사용하도록 하는데, 이처럼 단일 모드가 아닌 다중 모드를 사용하여 방사 패턴을 조절하는 혼 안테나를 다중 모드 혼 안테나라 한다[5],[6]. 본 절에서는 다중 모드 혼 안테나를 설계하고 방사 패턴을 분석하여 −25 dB 빔 폭이 감소함을 확인해 본다. 또한 모드 변환기와의 연결을 통해 그 특성을 확인해 본다.

혼 안테나의 개구면에서 테이퍼된 전계 분포를 얻으면 방사되는 주빔의 빔 폭은 증가하지만 부엽 레벨의 빔 폭이 줄어, 전체적인 −25 dB 빔 폭이 줄어들게 된다. 따라서 개구면에 테이퍼된 전계 분포를 얻는 것이 중요한데 이는 TE_{11} 모드와 TM_{11} 모드의 조합으로 얻을 수 있다[5],[6]. 이러한 조합은 혼 안테나의 입력부에 다중 모드 발생부와 위상 보정부를 두어 입력으로 TE_{11} 모드가 들어올 때 다중 모드 발생부에서 TM_{11} 모드를 발생시키고 위상 보정부를 통해 두 모드의 위상을 보정하여 개구면에서 동위상이 되도록 한다. 다중 모드 혼 안테나의 구조는 그림 4와 같다.

이러한 이론을 바탕으로 정전 파괴 현상을 방지하는 개구 반지름을 갖는 가장 좁은 −25 dB 빔 폭을 갖는 다중 모드 혼 안테나를 그림 5와 같이 설계하였다. 이때 가장 좁은 −25 dB 빔 폭을 가지는 혼 안테나의 개구면에서 발생된 최적의 모드 비율은 TE_{11} : TM_{11} : TE_{12} = 71.2 : 23.3 : 5.5이다. 여기서 TE_{12} 모드는 다중 모드 발생부와 혼 안테나의 열림

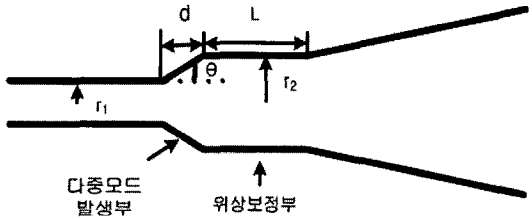


그림 4. 다중 모드 혼 안테나의 구조
Fig. 4. Multimode horn antenna structure.

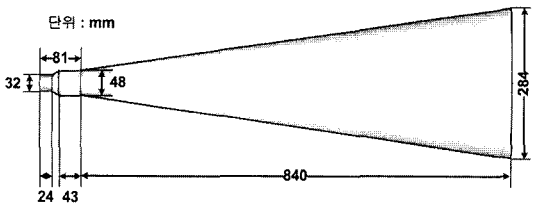


그림 5. 다중 모드 혼 안테나의 단면도
Fig. 5. Sectional view of multimode horn antenna.

각에서 발생하는 모드로 그 값은 작지만 최적의 모드 비율을 찾기 위해 고려해야 할 모드이다.

설계한 다중 모드 혼 안테나에 TE_{11} 급전을 넣으면 원형 혼 안테나보다 −25 dB 빔 폭이 좁아지는 특성을 얻을 수 있다. 시뮬레이션 수행 결과 나타난 방사 특성은 이득이 27.92 dBi이고 −25 dB 빔 폭은 수직 평면이 17.96°, 수평 평면이 28.88°가 되어 반사판 안테나의 부반사판은 가장자리 조사 수준을 −25 dB로 하기 위해 29°의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 한다. 이 값은 원형 혼 안테나를 사용할 경우의 값보다 약 10° 가량 줄어든 값이 된다.

하지만 실제 초고출력 안테나 시스템의 경우 급전 시스템을 구성하여야 하므로 모드 변환기와 혼 안테나를 연결한 후 TM_{01} 모드 급전을 하였을 때의 방사 패턴을 분석하여야 한다. 이때 TM_{01} 모드는 모드 변환기를 지나면서 약 95 %의 TE_{11} 모드로 변환되고 이외의 고차 모드인 TM_{01} 모드와 TE_{21} 모드가 생성됨을 언급하였다. 이러한 고차 모드들은 초고출력 원형 혼 안테나로 방사시 개구면에서 큰 비율을 가지지 않지만, 다중 모드 혼 안테나를 사용할 경우 다중 모드 발생부에서 증폭되어 개구면에서는 그 값이 증가하여 급전 시스템의 빔 폭을 증가시키는 원인이 된다. 이러한 급전 시스템의 방사 패턴을 시뮬레이션으로 분석한 결과 반사 손실은 −28.80

dB, 이득이 26.78 dBi이고 −25 dB 빔 폭은 수직 평면이 38.52°, 수평 평면이 41.80°가 되어 반사판 안테나의 부반사판은 가장자리 조사 수준을 −25 dB로 하기 위해 42°의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 한다. 즉 초고출력 원형 혼 안테나를 사용한 급전 시스템보다 성능이 더욱 떨어짐을 알 수 있다.

3-2 초고출력 안테나 시스템 급전용 다중 모드 혼 안테나

앞절에서 설계한 다중 모드 혼 안테나의 경우 모드 변환기의 출력에 포함된 TE_{11} 모드 이외의 고차 모드들로 인해 혼 안테나의 개구면에서는 원하는 형태의 테이퍼된 전계 분포를 얻을 수 없게 된다. 그 결과 부엽레벨이 증가하여 전체적인 −25 dB 빔 폭도 증가하게 된다. 이는 모드 변환기의 출력에 포함된 고차 모드인 TM_{01} 모드와 TE_{21} 모드 때문에 발생하는 현상으로 이러한 고차 모드를 제거하여 보다 높은 비율의 TE_{11} 모드가 혼 안테나로 유입될 수 있도록 하는 추가적인 구조 변형이 요구된다. 이는 도파관의 반지름에 따른 고차 모드의 차단 효과를 이용하여 구현할 수 있는데 표 1에 나타난 것처럼 8.8 mm 이상 11.5 mm 이하의 반지름으로 10 GHz에서 TE_{11} 모드만 전송할 수 있음을 확인할 수 있다.

정전 파괴 현상을 방지하기 위해 허용 범위 안에서 반지름이 클수록 유리하므로 반지름 11 mm를 혼 안테나의 입력단에 추가한다. 그 결과 혼 안테나 입력단에 그림 6의 확대한 부분과 같은 구조를 삽입하여 변형된 형태의 다중 모드 혼 안테나를 설계한다.

급전 시스템의 방사 패턴을 시뮬레이션으로 분석

표 1. 모드별 차단 주파수에 따른 도파관의 최소 반지름

Table 1. Minimum radius due to cutoff frequency of the first few TE and TM modes of circular waveguide.

모드	TE_{11}	TM_{01}	TE_{21}	TE_{01} TM_{11}	TM_{21}	TE_{12}
반지름	0.29 λ	0.38 λ	0.49 λ	0.61 λ	0.82 λ	0.85 λ
	8.8 mm	11.5 mm	14.6 mm	18.3 mm	24.5 mm	25.5 mm

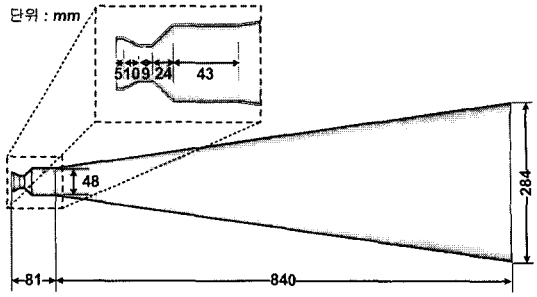


그림 6. 제안된 초고출력 급전용 다중 모드 혼 안테나의 단면도

Fig. 6. Sectional view of proposed multimode feed horn antenna for high power microwave.

한 결과 반사 손실이 −26.27 dB, 이득이 27.97 dBi이고 −25 dB 빔 폭은 수직 평면이 18.38°, 수평 평면이 28.94°가 되어 반사판 안테나의 부반사판은 가장자리 조사 수준을 −25 dB로 하기 위해 29°의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 한다. 이는 초고출력 원형 혼 안테나를 사용한 급전 시스템과 입구에 변형을 주지 않은 다중 모드 혼 안테나를 사용한 급전 시스템의 결과보다 개선된 결과임을 알 수 있다.

Ⅳ. 측정 결과

앞서 분석한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하도록 한다. 제작된 모드 변환기와 급전 혼 안테나를 연결한 형태는 그림 7과 같다.

구성된 급전 시스템의 방사 패턴은 근거리장 측정 시스템을 이용하여 측정하였다. 측정은 먼저 원형 혼 안테나를 사용한 급전 시스템의 방사 패턴을 측정하였고 이후에 다중 모드 혼 안테나를 사용한 급전 시스템, 제안된 초고출력 급전용 다중모드 혼

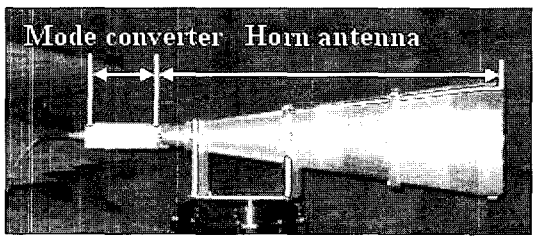


그림 7. 제작된 급전 시스템

Fig. 7. Fabricated feed system.

안테나를 이용한 급전 시스템의 방사 패턴을 측정하였다. 결과는 그림 8~10에 나타나 있다.

방사 패턴을 보면 전체적인 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 측정 결과를 정리하면 표 2와 같다. 측정 결과의 수직 평면과 수평 평면에서 넓은 -25 dB 빔 폭을 기

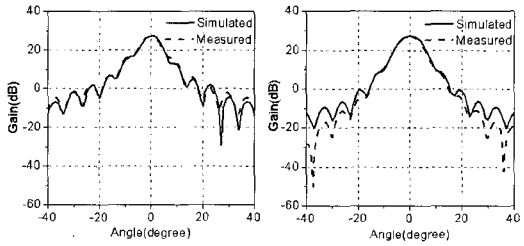


그림 8. 초고출력 원형 혼 안테나를 이용한 급전 시스템의 방사 패턴

Fig. 8. The radiation pattern of feed system which uses the conventional circular horn antenna for high power microwave.

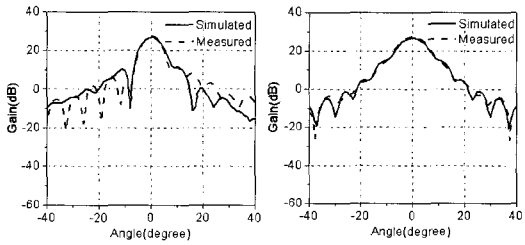


그림 9. 다중 모드 혼 안테나를 이용한 급전 시스템의 방사 패턴

Fig. 9. The radiation pattern of feed system which uses the multimode horn.

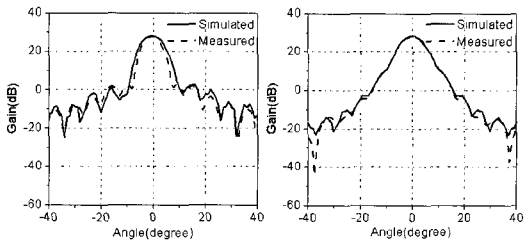


그림 10. 초고출력 급전용 다중 모드 혼 안테나를 이용한 급전 시스템의 방사 패턴

Fig. 10. The radiation pattern of feed system which uses the proposed multimode feed horn antenna for high power microwave.

표 2. 급전 시스템의 방사 특성

Table 2. Radiation characteristics of feed systems.

	초고출력 원형 혼 안테나		다중 모드 혼 안테나		초고출력 급전용 다중 모드 혼 안테나	
-25 dB 빔 폭	수직	수평	수직	수평	수직	수평
	37.44°	29.86°	45.42°	41.62°	20.24°	28.92°
이득	27.01 dBi		27.71 dBi		27.45 dBi	
반사 손실	-28.17 dB		-19.58 dB		-22.17 dB	

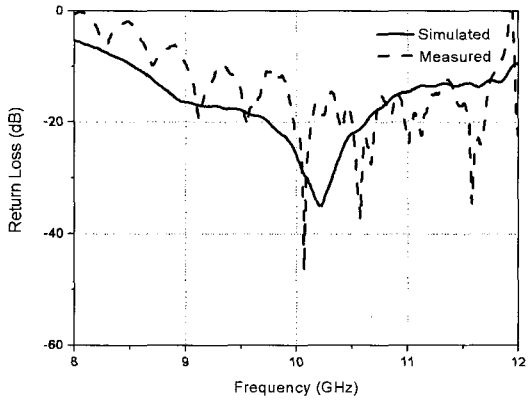


그림 11. 시뮬레이션 및 측정된 반사 손실 결과

Fig. 11. The return loss of simulated and measured results.

준으로 부반사판을 설계하므로 그 값을 비교한다. 이때 초고출력용 급전용 다중 모드 혼 안테나가 가장 좁은 28.92°의 빔 폭을 가지고 있음을 알 수 있다.

이때 제안된 안테나의 수직·수평 평면의 -25 dB 빔 폭은 대칭적이지 않은 결과를 보이는데 이는 수직·수평 평면의 개구 전개 분포가 같지 않기 때문이며 그 결과 반사기의 개구 효율이 다소 감소하게 된다. 그러나 -25 dB 값은 spillover 측면에서 중요하게 고려하여야 할 값이지만 전력 전달 측면에서는 큰 영향을 미치는 값이 아니므로 개구 효율의 감소가 크게 발생하지는 않는다.

반사 손실의 결과는 그림 11과 같다. 동작 주파수인 10 GHz에서 시뮬레이션 결과 -26.27 dB의 값을 얻었고, 측정 결과 -22.17 dB의 값을 얻었다.

V. 결 론

본 논문에서는 초고출력 안테나 시스템의 소형

화를 위해 모드 변환기의 출력을 고려한 최적화된 초고출력 급전용 다중 모드 혼 안테나를 제안하고 그 특성을 고찰하였다. 제작된 혼 안테나는 대기 중에서 100 MW 첨두 전력 전송이 가능하며, 높은 이득을 가짐으로써 초고출력 에너지 전송에 합당함을 보였다. 또한 일반적으로 사용되는 원형 혼 안테나에 비해 약 10° 가량의 좁은 −25 dB 빔 폭을 갖는 특성을 가지므로 전체적인 안테나 시스템의 소형화를 이룰 수 있다. 이는 초고출력 반사판 안테나 시스템의 급전부로 사용되기에 가장 적합한 형태이며 이동성을 고려한 소형화된 안테나 시스템의 구성을 가능케 하는 방향으로 응용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] C. Taylor, D. Giri, *High-Power Microwave Systems and Effects*, Taylor & Francis, London, 1994.

[2] 이상흔, 이병무, 이우상, 윤영중, 소준호, "초고출력 안테나 시스템 설계에 관한 연구 II 최대 지향 특성의 원형 혼 안테나", 한국전자파학회 종합학술대회 논문집, pp. 263-266, 2004년 11월.

[3] A. P. King, "The radiation characteristics of conical horn antennas", *Proceedings of IRE*, vol. 38, pp. 249-251, Mar. 1950.

[4] Byoung Moo Lee, Woo Sang Lee, Young Joong Yoon, and Joon Ho So, "X-band TM_{01}-TE_{11} mode converter with short length for high power", *IEE Electronics Letters*, vol. 40, no. 18, pp. 1126-1128, Sep. 2004.

[5] P. D. Potter, "A new horn with suppressed sidelobes and equal beamwidths", *Microwave J.*, pp. 71-78, Jun. 1963.

[6] AD Olver, PJB Clarricoats AA Kishk, and L Shafai, *Microwave Horns and Feeds*, IEEE Press, 1988.

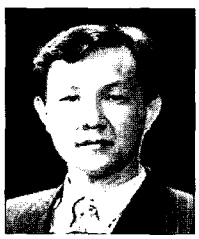
이 상 흔

2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학석사)
2006년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 초고출력 안테나 시스템, RFID

이 병 무

1998년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2005년 3월~현재: 삼성전자 TN 총괄 책임연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 초고출력 안테나 시스템, RFID

윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술 연구단
1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC

소 준 호

1988년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
2006년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학박사)
1990년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 능동 위상배열 안테나 시스템 및 전자파 수치해석