

모드정합 컨버터에 기반한 광대역 원뿔형 주름 혼안테나 설계 및 분석

이동학, 양두영*
제주대학교 통신공학과

Analysis and Design of a Wideband Corrugated Conical Horn Antenna Based on Mode Matching Converter

Dong-Hak Lee, Doo-Yeong Yang*

Department of Telecommunication Engineering, Jeju National University

요약 본 논문에서는 Ku 밴드 전체 대역에 걸쳐 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있는 원뿔형 주름 혼안테나의 설계방법을 제안하였다. 혼안테나의 이득, 정재파비, 주편파와 교차편파의 비와 광대역 특성을 개선시키기 위하여 두 종류의 모드정합 컨버터를 원뿔형 주름 혼안테나 내부에 구성하였다. 하나의 형태는 원형도파관 종단 내부에 또 다른 형태는 혼플레어 전단에 설치하였다. 제안된 모드정합 컨버터들의 위치에 따라 두 가지 형태의 안테나 구조는 시뮬레이션을 통해 비교하고 분석되었다. 그리고 Ku 밴드 전체 주파수 대역인 12-18 GHz에서 정재파비가 2보다 작고 교차편파와 주편파의 비가 30dB, 안테나 이득이 20dB 이상인 값에서 안테나의 성능을 비교한 결과, 원형도파관 내에 모드정합 컨버터를 설계한 원뿔형 주름 혼안테나의 구조가 혼플레어 내에 모드정합 컨버터를 설계한 안테나의 구조보다 제반 성능이 더욱 안정적이고, 동시에 송수신할 수 있는 신호 주파수 대역이 광대역 특성을 갖는다. 따라서 이득과 VSWR, 복사패턴, 대역폭 등을 감안했을 때, 원형도파관 내부에 모드정합 컨버터를 설계한 구조가 좀 더 뛰어난 성능을 보였다.

Abstract In this paper, the design methodology of a corrugated conical horn antenna is proposed to be obtain wide-band properties over the full range of frequencies in the Ku-band. In order to improve the properties of the corrugated conical horn antenna, such as its gain, VSWR, co-polarization to cross-polarization ratio and wide-bandwidth, two types of mode matching converters are implemented within it. One is located at the end of the circular waveguide, while the other is positioned in front of the horn-flare section. The properties of the antenna are analyzed and compared according to the position of the proposed converters through simulations. In the comparison of the antenna performance in the case where the VSWR, co-polarization to cross-polarization ratio and antenna gain over the Ku band of 12-18 GHz are less than 2, greater than 30dB and 20dB respectively, the former antenna exhibits greater stability and a wider frequency band than the latter from the viewpoint of transmitting and receiving signals simultaneously. Therefore, considering the gain, VSWR, radiation pattern and bandwidth, the horn antenna structure in which the mode matching converter is implemented inside the circular waveguide has better performance than the other.

Keywords : corrugated conical horn, design methodology, Ku-band, mode matching converter, wide-bandwidth

본 논문은 2016학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Doo-Yeong Yang(Jeju National Univ.)

Tel: +82-64-754-3636 email: yeongyd@jejunu.ac.kr

Received April 7, 2016

Revised May 27, 2016

Accepted July 7, 2016

Published July 31, 2016

1. 서론

원뿔형 주름 혼안테나(corrugated conical horn antenna)는 높은 지향성과 이득, 그리고 낮은 부엽과 대칭적인 복사패턴을 갖는다. 또한, 주편파와 교차편파의 비가 크기 때문에 주로 이중편파를 이용하는 위성통신용 반사판 안테나의 급진소자로 사용된다[1]. 이러한 주름 혼안테나에 관한 연구는 1962년 Kay에 의해 처음 연구되기 시작하였으며[2], 1980년대에 이르러서는 혼의 제반 특성을 개선하기 위한 모드컨버터에 대한 연구가 발표되었다. 모드컨버터는 주로 원형도파관의 기본모드인 TE_{11} 모드를 주름 혼안테나의 평형 하이브리드 모드(balanced hybrid mode)인 HE_{11} 모드로 전파모드를 변환시키며, 혼의 임피던스 정합과 대칭적인 복사패턴, 그리고 교차편파에 영향을 준다. James는 원형도파관 내부에 홈을 추가하여 홈의 크기를 가변시키는 방법으로 광대역 특성을 얻을 수 있는 모드컨버터 구조를 제안하였으며[3], Thomas와 함께 원형도파관 내부와 혼안테나 내부에 Ring-load 슬롯 구조를 제안하여 보다 넓은 광대역 특성을 얻을 수 있도록 연구하였다[4-5]. 또한 Zhang은 혼안테나의 내부에 홈과 마루부분을 단계적으로 변화 시킴으로써 광대역 특성을 얻는 연구를 발표하였다[6]. 최근에는 혼안테나의 크기를 줄이기 위해 축방향으로 홈을 추가하여 설계하는 방법들이 연구되고 있으나[7-8], 양축방향에 홈을 설계하여 제작해야하기 때문에 공정상에 어려움이 따른다.

본 논문에서는 Ku 밴드 전체 대역에 걸쳐 광대역 주파수 특성을 얻을 수 있는 원뿔형 주름 혼안테나의 설계 방법을 제안한다. 설계하고자 하는 혼안테나의 기본 형태는 안테나의 크기와 중량을 줄일 수 있도록 모드정합 컨버터(mode matching converter)와 혼플레어(horn flare)를 연결한 이분구조이다. 모드정합 컨버터는 혼의 전파모드인 HE_{11} 모드로의 변환과 어드미턴스 정합 역할을 하며, 혼플레어는 평형 하이브리드 모드인 HE_{11} 모드로부터 고차 혼성모드의 발생을 억제하고 교차편파를 줄이면서 혼의 빔 패턴과 이득을 향상시킨다. 특히, 혼안테나의 대역폭, 주편파와 교차편파 비의 특성은 모드정합 컨버터의 홈 배치와 설계 방법에 따라 매우 달라진다. 따라서 본 논문에서는 모드정합 컨버터의 위치와 설계 방법에 따라 나타나는 광대역 정합 특성을 분석한 후, 제작이 용이하고 제반 성능이 우수한 원뿔형 주름 혼안테나를 설

계한다.

2. 혼의 기본 구조

원뿔형 주름 혼안테나의 일반적인 설계 구조는 크게 두 가지 형태인 이분구조(two-part structure)와 사분구조(four-part structure)로 나눌 수 있다. 대표적인 이분구조는 혼의 평형 하이브리드 모드인 HE_{11} 모드로 변환하는 모드컨버터(mode converter), 그리고 혼의 빔 패턴과 이득 특성을 결정하는 혼플레어(horn flare)로 구성되며, 사분구조는 이분구조의 두 섹션과 더불어, 발생된 고차 혼성모드의 역 전달을 줄여주는 테이퍼 섹션(taper section), 그리고 모드컨버터 섹션과 혼플레어 섹션을 연결해주는 천이섹션(transition section)을 포함한다. 본 논문에서는 혼안테나의 크기와 성능을 고려하여 주름 혼안테나의 구조를 이분구조로 구성하였으며, 12-18 GHz의 Ku 밴드 전주파수 대역에 걸쳐 광대역 특성과 우수한 성능을 유지할 수 있도록 모드정합 컨버터를 원형도파관 내부 또는 혼플레어 내부에 배치하는 서로 다른 구조의 혼안테나를 설계하고, 그 특성을 분석하고자 한다. 혼의 성능 분석을 위한 이분구조에 따른 원뿔형 주름 혼안테나의 설계 구조는 그림 1과 같다.

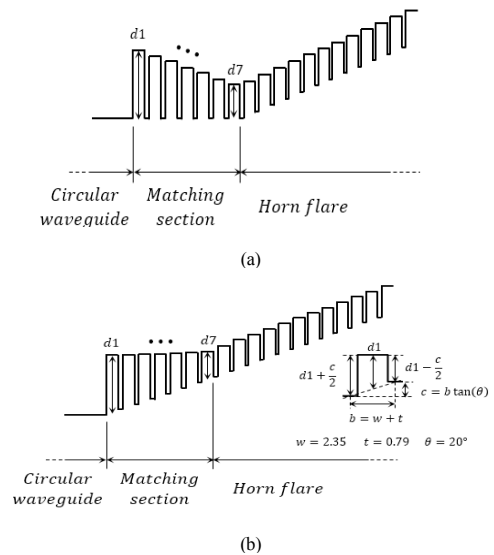


Fig. 1. Design structures of corrugated conical horn antenna

- (a) The horn matched in waveguide
- (b) The horn matched in horn flare

그림 1은 광대역 특성을 얻기 위해 혼의 목 부분에 어드미턴스 정합과 전파 모드변환을 위해 정합모드컨버터 섹션을 추가한 원뿔형 주름 혼안테나의 구조를 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 혼플레어와 연결되는 입력 도파관인 원형도파관 내부에 다수개의 홈을 내고 홈의 깊이를 비례적으로 변화시켜 어드미턴스 정합을 이루도록 모드정합 컨버터를 구성한 혼안테나 설계구조이며, 그림 1(b)는 혼플레어 내부에 다수개의 홈을 혼플레어와 동일 각(flare angle)으로 변화시키면서 깊이를 조정하여 어드미턴스 정합과 전파모드를 변환시키도록 구성한 혼안테나의 설계구조이다.

3. 홈 주름과 정합섹션 설계

3.1 커러게이트 혼플레어 설계

주름 혼안테나의 입력 어드미턴스와 이득 및 복사패턴 특성은 다음과 같은 설계파라미터에 의해 결정된다. 주름의 폭과 마루의 비를 $\delta = w/(w+t)$ 로 가정할 경우에 δ 는 안테나의 교차편과 레벨에 영향을 주며, 이 값은 일반적으로 $0.5 \leq \delta \leq 0.9$ 의 범위에 놓인다[9]. 논문에서는 교차편과 레벨이 비교적 낮은 $\delta = 0.75$ 로 설계하였으며, 과장 당 7개의 주름을 주어 주편과와 이득 특성이 향상 되도록 $w = 2.35 \text{ mm}$, $t = 0.79 \text{ mm}$ 로 설계하였다. 안테나의 전체 길이 L은 주름의 효율과 사이드로브 레벨에 영향을 미치는데, 일반적인 설계에서 안테나의 총 길이는 5λ 에서 10λ 사이로 설계한다. 논문에서 설계된 혼안테나의 전체 길이는 8λ 이다. 마지막으로 혼의 반각은 반사판 안테나의 급전소자로써의 사용을 고려하여 $\theta = 20^\circ$ 로 설정한다.

정합섹션을 제외한 혼 내부의 주름 깊이는 혼 내부에서의 평형 하이브리드 모드해석에 의해 $\lambda/4$ 로 많이 알려져 있다[10][11]. 하지만 일반적으로 사용되는 혼의 경우, 축 방향에 수직으로 주름을 설계하기 때문에 혼 내부의 깊이가 $\lambda/4$ 로 일정하지가 않다. 따라서 혼플레어 구간에 주름을 최적화하기 위해 깊이를 다음과 같이 설계하여 그 특성을 비교할 필요가 있다.

그림 2에서 그림 2(a) 형태의 주름을 그림 2(b) 형태로 설계할 경우 $\lambda/4$ 의 홈 깊이를 형성하는 지점을 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 먼저, 주름의 전방점 (forward point)인 $h1$ 의 길이를 $\lambda/4$ 로, 중앙점(mid point)인 $h1$ 과

$h2$ 사이의 깊이를 $\lambda/4$ 로, 그리고 후방점(backward point)인 $h2$ 를 $\lambda/4$ 로 설계하는 방법이다. 이렇게 해석해야 하는 이유는 미세한 길이의 차이로 인하여 홈 입구에서 어드미턴스 값이 0이 되지 않아 어드미턴스 정합을 이루기 어렵고, 혼 내부의 전파모드인 평형 하이브리드 모드의 특성이 깨지기 때문이다.

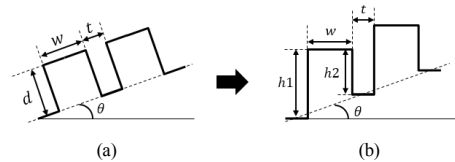


Fig. 2. Corrugation design in horn flare section
(a) Inclined corrugation (b) Upright corrugation

그림 3은 모드정합법(mode matching method)과 최적화기법인 유전알고리즘(genetic algorithm)을 적용하여 혼안테나를 설계하는 상용 툴인 WASP-NET[12]을 사용하여 혼플레어 영역에서 홈 주름 설계에 따른 S_{11} 특성을 시뮬레이션하고 비교한 그림이다.

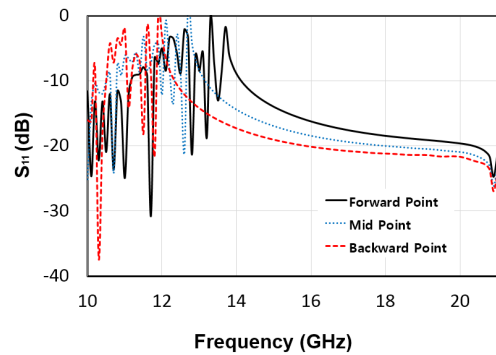


Fig. 3. Simulation characteristics of corrugation design in horn flare section

그림 3의 결과에서 알 수 있듯이 홈의 깊이를 후방점에서 $\lambda/4$ 로 설계한 혼의 S_{11} 특성이 전방점과 중앙점 방법에 비해서 좀 더 넓은 대역을 포함하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 혼플레어 내부의 주름에 대한 설계 제한은 후방점 방식을 사용하여

$$\begin{aligned} h1 &= (w+t)\tan\theta + h2 \\ h2 &= \lambda/4 \end{aligned} \quad (1)$$

가 되도록 설계한다.

3.2 모드컨버터 설계

모드정합 컨버터 섹션은 입력된 원형도파관의 TE_{11} 모드를 주름 혼안테나의 HE_{11} 모드로 변환하고, 원형도파관의 어드미턴스와 혼의 입력 어드미턴스를 정합하는 영역이다. 원형도파관과 주름 혼플레어 간의 어드미턴스 정합으로 인하여 완벽한 HE_{11} 모드의 여기가 결정되므로 이 부분의 설계는 매우 중요하다. 일반적인 설계에서 모드정합 컨버터의 주름 깊이는 처음 $\lambda/2$ 로 시작하여 선형적으로 줄이면서 마지막 주름의 깊이가 $\lambda/4$ 가 되도록 설계한다. 본 논문에서 구성한 모드정합 컨버터 설계에 사용한 주름의 개수는 7개이며, 깊이 변화에 대한 데이터는 표 1에 나타내었다.

Table 1. Depth data of corrugated horn used in matching section

Para.	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7
depth [mm]	8.35	8.00	7.65	7.30	6.95	6.60	6.25

4. 시뮬레이션 결과

혼안테나를 설계함에 있어서 원형도파관의 기본모드인 TE_{11} 모드와 혼 내부의 평형 하이브리드 모드인 HE_{11} 모드 간에 모드정합은 TE_{11} 모드의 어드미턴스와 HE_{11} 모드의 어드미턴스를 계산하여 그 특성으로부터 찾을 수 있다.

원형도파관에서의 TE_{11} 모드의 어드미턴스는 관내에 존재하는 전자계로부터 다음과 같이 구할 수 있다[1].

$$Z_{TE_{11}} = \frac{E_\rho}{H_\phi} = -\frac{E_\phi}{H_\rho} = \frac{\eta k}{\beta_{11}} \quad (2)$$

$$\beta_{11} = \sqrt{k^2 - k_c^2} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{1.841}{a}\right)^2}$$

$$Y_{TE_{11}} = \frac{1}{Z_{TE_{11}}}$$

여기서 $Z_{TE_{11}}$ 은 원형도파관에서의 기본모드인 TE_{11} 모드의 임피던스이며, η 는 매질의 고유 임피던스, k 는 파수, k_c 는 차단파수, β_{11} 는 기본모드 TE_{11} 의 전파상수이다. 또한 a 는 원형도파관의 반경을 나타낸다.

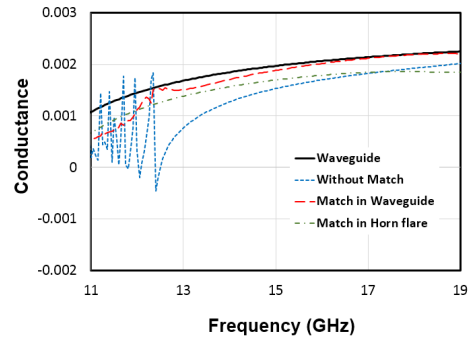
혼의 입력 어드미턴스는 혼의 목인 입력단에서의 반사계수인 그림 3의 값을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_{HE_{11}} = \frac{1}{Z_{TE_{11}}}(g_L + jb_L) \quad (3)$$

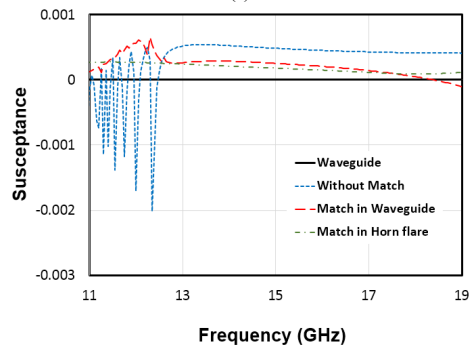
$$g_L = \frac{1 - S_{11r}^2 - S_{11i}^2}{(1 + S_{11r})^2 + S_{11i}^2}$$

$$b_L = \frac{-2S_{11i}}{(1 + S_{11r})^2 + S_{11i}^2}$$

여기서 S_{11r}, S_{11i} 는 각각 S_{11} 의 실수 값과 허수 값이며, g_L 은 혼의 목 부분에서 혼안테나를 바라본 정규화된 어드미턴스의 컨덕턴스, b_L 은 정규화된 서셉턴스이며, $Y_{HE_{11}}$ 은 주름 혼 내부의 주모드인 HE_{11} 모드의 어드미턴스이다.



(a)



(b)

Fig. 4. Admittance characteristics of corrugated conical horn

(a) Conductance (b) Susceptance

그림 4는 원형도파관 WC-69와 주름 혼안테나가 결합된 혼의 목 지점에서 입력 도파관의 기본모드인 TE_{11} 모드의 어드미턴스와 주름 혼 내부의 평형 하이브리드모드인 HE_{11} 모드의 어드미턴스를 나타낸 것이다. 여기서 흑색 실선(‘Waveguide’)은 TE_{11} 모드가 입사된 원형도파관의 어드미턴스, 청색 점선(‘Without Match’)은 모드정합 컨버터가 없이 HE_{11} 모드가 존재하는 주름 혼 내부의 어드미턴스, 적색 파선(‘Match in Waveguide’)은 모드정합 컨버터가 원형도파관 내에 있는 그림 1(a)의 설계방법에 따른 어드미턴스, 그리고 녹색 파분선(‘Match in Horn flare’)은 모드정합 컨버터가 혼플레어 내에 있는 그림 1(b)의 설계방법에 따른 어드미턴스 값을 나타낸다. 이 그림에서 살펴보면 모드정합 컨버터가 없는 어드미턴스 값은 모드정합 컨버터가 원형도파관 내부와 혼플레어 내부에 있는 경우보다 13GHz이하에서 매우 크게 변동하고, 전체 동작주파수대역에서 급전 도파관인 원형도파관의 어드미턴스 값과 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이것은 모드정합 컨버터가 없을 경우, 설계하고자하는 주파수 전체대역에서 광대역 정합을 이루는 주름 혼안테나를 설계하기 힘들다는 것을 의미한다. 그러나 정합모드컨버터를 혼 내부에 구성하여 넣었다 할지라도 안테나의 모든 제반 특성을 만족한다고 할 수 없기 때문에 정재파비(VSWR), 이득 (gain), 복사패턴(radiation pattern) 특성들을 면밀히 파악하여 제반 성능을 비교하고 분석하여야 한다. 따라서 그림 1에서 언급한 모드정합 컨버터에 대하여 그림 1(a)와 그림 1(b)의 구조 중 어느 것이 더 적합한 지를 비교하고 더 우수한 성능의 주름 혼안테나 설계 방법을 찾아야 한다.

그림 5는 혼안테나 내부에 모드정합 컨버터가 없는 경우와 있는 경우에 대하여 주파수에 따라 나타나는 정재파비와 이득 특성을 나타낸 그래프이다. 그림 5(a)에서 흑색 실선의 그래프는 모드정합 컨버터가 없는 경우의 정재파비 특성이고, 청색 파선은 모드정합 컨버터가 원형도파관 내부에 있는 경우, 적색 점선은 모드정합 컨버터가 혼플레어 내부에 구성된 경우의 특성이다. 주파수에 따른 정재파비 특성을 살펴보면, 위에서 언급한 모드정합 컨버터가 있는 혼안테나의 경우는 정재파비가 모두 1.0-1.9의 값에 놓임으로써 Ku 밴드인 12-18 GHz 전 주파수 범위에서 광대역 특성을 나타냄을 알 수 있다. 특히 광대역 특성을 갖는 모드정합 컨버터가 고려된 두 경우를 서로 비교해보면, 15GHz 이상의 주파수 대역에서

는 모드정합 컨버터가 혼플레어 내부에 있는 경우가 도파관 내부에 있는 경우보다 정재파비 값이 0.23 정도 높게 나타나지만 11.9 GHz보다 낮은 주파수 대역에서는 2보다 작은 값을 유지하기 때문에 좀 더 좋은 광대역 특성을 나타낸다. 또한, 그림 5(b)의 이득 값은 낮은 주파수 대역에서는 20.7-22.2dB 범위로 전체적으로 비슷한 값을 가지지만 16.3GHz 보다 높은 주파수 대역으로 올라가면 최대 1dB 정도 낮아지는 특성을 보인다.

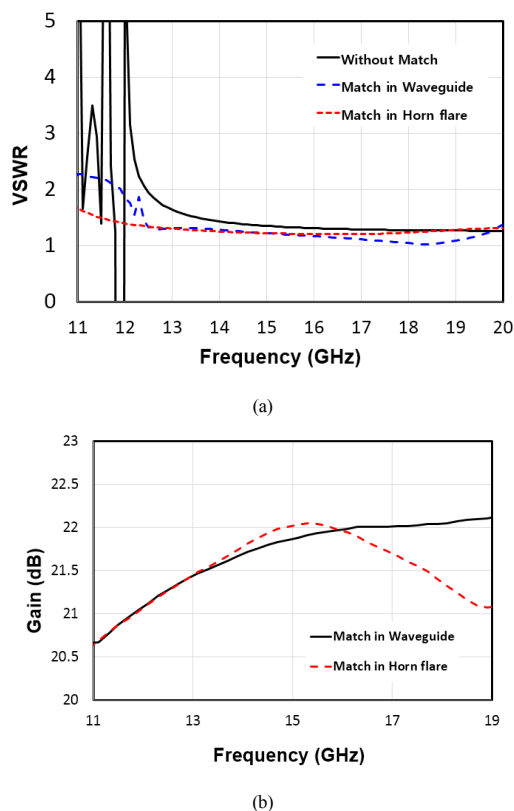
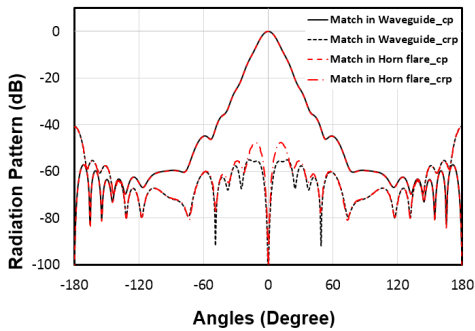


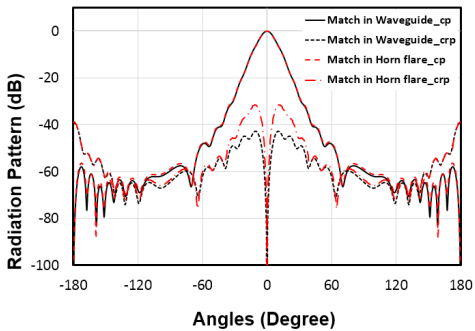
Fig. 5. VSWR and gain characteristics (a) VSWR (b)Gain

그림 6은 모드정합 컨버터가 두 가지 경우로 설계된 혼안테나의 복사패턴 특성을 비교한 것이다. 그림 6(a)는 동작 주파수 대역에서 주편파(co-polarization)와 교차편파(cross-polarization)의 비가 가장 좋은 주파수 대역인 13.0GHz에서의 복사패턴을 나타낸 것이다. 이때의 도파관내 정합과 혼플레어내 정합에 대한 교차편파의 차이가 복사각 $\pm 11.5^\circ$ 에서 가장 크게 나타났으며, 약 8.1dB 정도의 차이를 보였다. 그림 6(b)는 15.5GHz인 중

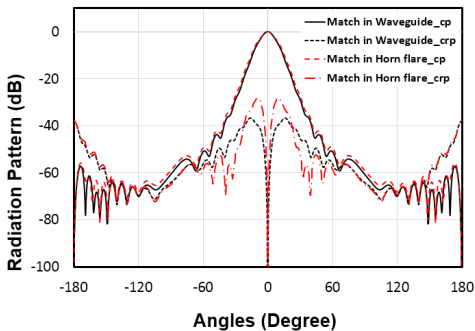
심 주파수에서의 복사패턴을 나타낸 것으로 주파수가 13.0GHz일 때와 비교하여 교차편파의 차이가 더욱 크게 나타났으며 $\pm 15^\circ$ 에서 약 12dB 정도로 가장 큰 차이를 보였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Radiation pattern of the corrugated conical horn (a) $f = 13.0$ GHz (b) $f = 15.5$ GHz (c) $f = 18.0$ GHz

그림 6(c)는 18.0GHz에서의 복사패턴으로 $\pm 8^\circ$ 에서 최대 11.6dB의 차이를 보였으며, 혼플레어내 정합의 경

우 $\pm 7^\circ \sim \pm 12.5^\circ$ 범위에서 주편파와 교차편파와의 비가 30dB보다 작게 나타난다. 결과적으로, 주파수 대역 전체에 걸쳐 도파관내 정합의 경우가 혼플레어내 정합에 비해서 좋은 교차편파 특성을 갖는다.

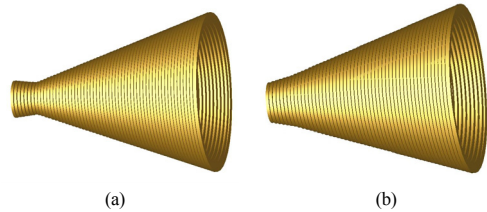


Fig. 7. Geometry of the corrugated conical horn antenna (a) Matched in waveguide (b) Matched in horn flare

그림 7은 상용 톨인 WASP-NET에서 설계한 원뿔형 주름 혼안테나의 단면과 3D 도형이다. 이에 따른 전체적인 설계 파라미터들은 표 2에 나타내었다.

Table 2. Design parameters

Design Parameters				
r[mm]	w[mm]	t[mm]	h1[mm]	h2[mm]
8.74	2.35	0.79	7.4	6.25
δ	$\theta [^\circ]$	L1[mm]	L2[mm]	
0.75	20	185.26	163.28	
Mode Matching Section				
d1[mm]	d2[mm]	d3[mm]	d4[mm]	d5[mm]
8.35	8.00	7.65	7.30	6.95
d6[mm]	d7[mm]			
6.60	6.25			

표 2에서 r은 원형도파관의 반지름, w는 주름의 폭, t는 마루의 폭, h1과 h2는 각각 혼플레어 내부에서 주름의 전방높이와 후방높이이다. δ 은 w와 t의 비, θ 는 혼의 반각, d1-d7은 모드컨버터에서의 홈의 깊이, L1과 L2는 각각 도파관내 정합과 혼플레어내 정합에 대한 안테나 총 길이이다. 도파관내 정합의 경우 모드컨버터에 사용되는 홈의 깊이는 표 2의 값이 그대로 적용되지만, 혼플레어 내부 정합의 경우는 표 2의 값에 식(1)을 적용하여 홈의 깊이가 정해진다.

5. 결론

Ku 밴드 전체 대역에 걸쳐 광대역 주파수 특성을 얻

기 위한 원뿔형 주름 혼안테나의 구조를 제안하고 분석하였다. 제안한 두 가지 모드정합 컨버터는 7개의 주름을 갖는 구조로 설계하여 혼의 목과 접하는 원형도파관 내부와 혼플래어 내부에 각각 구성하였고, WASP-NET을 사용하여 이들의 특성을 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션한 결과, 원형도파관 내부에 모드정합 컨버터가 있는 혼안테나 구조가 혼플래어 내부에 있는 구조보다 정재파비 특성과 이득 특성은 비슷하지만 복사패턴, 주편파와 교차편파의 비에 따른 특성 면에서는 전 주파수 대역에 걸쳐 크게 향상된다. 따라서 Ku 밴드 전 주파수 대역인 12-18 GHz에서 정재파비가 2보다 작고 교차편파와 주편파의 비가 35dB 이상인 값에서 비교하였을 때, 원형도파관 내에 모드정합 컨버터를 설계한 원뿔형 주름 혼안테나 구조가 혼플래어 내에 모드정합 컨버터를 설계한 구조보다 좀 더 우수한 특성을 갖는다.

References

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison-Wesley, 1990.
- [2] A. F. Key, "The Wide Flare Horn a Novel Feed for Low Noise Broadband and High Aperture Efficiency Antenna", TRG Rep., Air Force Res. Lab. Contract AF 19(604)-8507, no. 2, 1962.
- [3] G. L. James, "Analysis and Design of TE_{11} to HE_{11} Corrugated Cylindrical Waveguide Mode Converter", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-29, no 10, pp. 1059-1066, 1981. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.1981.1130499>
- [4] G. L. James, B. M. Thomas, " TE_{11} to HE_{11} Cylindrical Waveguide Mode Converters Using Ring-Loaded Slots", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-30, no.3, pp. 278-285, 1982. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131062>
- [5] G. L. James, B. M. Thomas, K. J. Greene, "Design of Wide-Band Corrugated Conical Horns for Cassegrain Antenna", *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, vol. AP-34, no. 6, pp. 750-757, 1986. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.1986.1143899>
- [6] X. Zhang, "Design of Conical Corrugated Feed Horn for Wide-Band High-Frequency Applications", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 41, no. 8, pp. 1263-1274, 1993. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/22.241664>
- [7] Q. Zhao, H. He, L. Xi, W. Shao, "Miniaturization design of dual-slot corrugated horn antenna on Ka-band", *2014 IEEE International Conference, Communication Problem-Solving (ICCP)*, pp. 431-434, 2014.
- [8] P. Soares, P. Pinho, R. Gonçalves, "Corrugated Horn Antenna for CosmoGal Satellite with Reduced Dimensions", *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1648-4649, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/APS.2014.6905150>

- [9] C. A. Mentzer, "Properties of Cutoff Corrugated Surfaces for Corrugated Horn Design", *IEEE Transaction on Antenna and Propagation*, vol. AP-22, no. 2, pp. 191-196, 1974. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.1974.1140757>
- [10] P. J. B. Clarricoats, P. K. Saha, "Propagation and Radiation Behaviour of Corrugated Feeds, Part 1 : Corrugated Waveguide Feed", *Proc. IEE*, vol. 118, no. 9, pp. 1167-1176, sept. 1971. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/piee.1971.0211>
- [11] P. J. B. Clarricoats, P. K. Sara, "Propagaion and Radiation Behaviour of Corrugated Feeds, Part 2 : Corrugated-Conical Feed", *Proc. IEE*, vol. 118, no. 9, pp. 1177-1186, 1971. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/piee.1971.0212>
- [12] MiG, *Waveguide and Antenna Synthesis Program for Networks(WASP-NET), Version 8.4*, Microwave Innovation Group GmbH & Co. KG, Germany.

이 동 학(Dong-Hak Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 제주대학교 통신공학과 (공학사)
- 2015년 2월 ~ 현재 : 제주대학교 통신학과 석사과정

<관심분야>

안테나, RF회로 및 무선통신시스템 설계

양 두 영(Doo-Yeong Yang)

[정회원]



- 1984년 2월 : 제주대학교 통신공학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과 (공학박사)
- 2001년 1월 ~ 2002년 8월 : 유타주립대학교 연구교수
- 1992년 3월 ~ 현재 : 제주대학교 통신공학과 교수

<관심분야>

RF회로 및 무선통신시스템 설계