

X-형 모노펄스 축구조를 가지는 도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 안테나의 설계

Design of a Waveguide Broad-wall Longitudinal Slot Array Antenna of X-type Monopulse Axes

나 형 기 · 박 창 현

Hyung-Gi Na · Chang-Hyun Park

요 약

본 논문에서는 X-형 모노펄스 축 구조를 가지는 도파관 광벽 슬롯 배열 모노펄스 안테나의 설계 방법을 제안하고, 제작을 통하여 방법의 타당성과 안테나 특성을 검증하였다. 본 논문에서의 안테나는 크기가 작아서 연속함수의 복사면 분포함수가 부적합하며, 모노펄스 축 구조가 X-형이기 때문에 안테나 각 분면이 대칭적이지 않다. 또한 도파관 높이가 0.1 파장 정도로 매우 낮기 때문에 일반적인 경우와 같이 슬롯 특성을 쉽게 모델링하기가 어렵다. 이러한 이유 때문에, 본 논문에서는 무작위수를 이용하여 복사면 분포를 최적화하고, 이 과정에서 안테나 각 분면의 출력 파워가 같도록 복사 분면 가중치를 조절하였다. 또한 내삽법을 이용해서 모멘트 행렬의 일부를 미리 계산해서 사용함으로써 계산 속도를 높이고, 배열 합성 프로그램의 서브프로그램으로 첨부하여 필요할 때마다 직접 계산해서 사용될 수 있도록 하였다. 이러한 방법으로 설계된 안테나를 직접 제작하여 28 dBi의 이득을 확인하였으며, 안테나 빔폭, 효율, 부엽준위도 설계치와 유사한 특성을 보였다.

Abstract

In this paper, the design method of a waveguide broad-wall longitudinal slot array monopulse antenna of X-type monopulse axes is presented, and the method is verified through manufacture and measurement. In the antenna design of this paper, the antenna size is small and the monopulse axes are X-type. Thus, the common continuous aperture distribution function is not suitable and the power balance among antenna quadrants should be considered. Also, since the waveguide height is reduced into 0.1 wavelength, the modelling of the slot characteristics is not simple. Thus, in this paper, the aperture distribution is optimized by using random number, and the balance among the quadrants is achieved by applying the quadrant weighting factor during the aperture optimization process. Also, the moment method procedure is accelerated by applying the interpolation technique to some part of the moment matrix, and the moment method procedure is added to the array synthesis program as a subroutine so that the slot characteristics can be calculated directly when it is required. Based on this method, a antenna of 28dBi is designed and manufactured. It is found that the antenna characteristics is similar to design data.

Key words : waveguide slot antenna, array antenna, monopulse antenna.

I. 서 론

도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 안테나는 고효율 평면형 안테나이고, 구조적으로 튼튼한 안테나이어

LG 이노텍(LG Innotek)

· 논문 번호 : 20011023-149

· 수정완료일자 : 2001년 12월 13일

서, 항공기 및 미사일에 탑재되는 레이더 및 레이더 탐색기에 많이 쓰이는 안테나 구조이다. 이러한 안테나에 대한 설계 기술은 이전부터 많이 연구되어, 현재 여러 앞선 외국 업체에서는 안정화된 기술이나 국내에서는 이러한 안테나에 대한 소요가 없어서 최근까지 이러한 안테나에 대한 연구가 미미하였다. 본 논문에서는 기존에 문헌상으로 발표된 결과들을^{[1]·[7]} 토대로 X-형 모노펄스 구조를 가지는 도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 모노펄스 안테나의 설계 방법에 대해서 생각하였다.

본 논문에서와 같은 도파관 광벽 슬롯 배열 모노펄스 안테나의 설계는 기능적으로 크게 4부분으로 나누어진다. 이 4부분에는, 안테나의 빔폭과 부엽준위(SLL, SideLobe Level) 및 안테나 복사면 효율(Aperture Efficiency)을 정하기 위한 복사면 분포 설계가 있으며, 각 복사소자(Radiation Element)의 위치와 길이를 조절하여 설계된 복사면 분포에 따라 모든 복사소자가 공진 상태가 되게 하는 안테나 배열설계, 여러개의 복사 도파관으로 파워를 분배해주는 급전구조 설계 및 모노펄스 기능 구현을 위한 모노펄스 비교기 설계가 있다. 본 논문에서는 X-형 모노펄스 축구조를 구현하기 위한 복사면 설계 방법에 초점을 두었으며, 그 외에 전체 안테나 설계를 위한 슬롯 특성분석, 배열설계, 급전구조 설계 등에 대해서는, 기존에 발표된 결과들^{[1]·[7]} 참조하여 간략하게 응용 방법을 설명하였다.

안테나 복사면 설계를 위해서는 일반적으로 Taylor, 코사인제곱(Cosine Square) 등의 연속함수 분포가 많이 쓰인다. 그러나 본 논문에서와 같이 복사면(Radiation Aperture)이 크지 않은 안테나에서는, 연속함수(Continuous Function) 분포를 제대로 나타내기에 복사 소자(Radiation Element)의 수가 부족하다. 또한 모노펄스 축이 45° 방향으로 되어 있기 때문에 효율적인 모노펄스 비교기(Monopulse Comparator)의 설계를 위해서는 4개의 안테나 분면에서의 복사 파워량이 같도록 설계되어야 하는데, 이를 위해서는 하나의 연속함수 분포는 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 무작위수(Random Number)를 이용하여 복사면 분포를 변화시키고, 각 분면의 복사 파워량이 같도록 복사면 분포를 조절한 다음, 안테나 패턴이 개선된 경우만 분포 변화를 취하는

방식의 과정을 반복하여 안테나 빔폭(Beam Width), 부엽준위(Sidelobe Level)를 최적화 하였다.

도파관 슬롯의 특성을 구하기 위해서는, 이전에는 실험을 통해서 얻은 결과를 이용하였다^[1]. 그러나 근래에는 모멘트법에 의한 수치해석 방법이 발달하여^{[2]·[3]}, 도파관 슬롯 배열 합성 프로그램의 서브루틴(Subroutine) 형태로 사용하여도 시간적으로 큰 어려움은 없다. 특히 본 논문에서와 같이 도파관 높이가 0.1 파장 정도로, 표준 도파관 높이의 1/4 정도인 경우는 도파관 슬롯의 반사계수와 전달계수의 공진주파수가 크게 다르며 이전 방법에서처럼 슬롯 특성 데이터를 간단한 수식으로 나타내기도 힘들다. 본 논문에서는 도파관 단일 슬롯 특성 해석을 위해서 Josefsson^[2]의 방법에서 계산속도를 개선하여 사용하였다.

배열의 합성을 위해서는, 기본적으로 Elliott^{[1]·[4]·[6]}의 배열 합성 공식을 이용하여, 각 슬롯이 주어진 가중치(Weighting Factor)로 공진이 되도록 슬롯의 위치와 길이를 조절하는 과정을, 여러 슬롯에서 반복적으로 되풀이해서 모든 슬롯에서 특성이 만족되도록 하였다. 급전구조를 설계하기 위해서는 기울어진 슬롯을 이용해서 복사도파관을 급전하는 방법을 사용하였으며, 같은 방식으로 기울어진 슬롯을 포함하고 있는 4개의 안테나 분면도 급전하였다. 이러한 방법을 이용하여 150개의 슬롯이 있는 X-형 모노펄스 안테나를 설계하였으며, 실험결과를 통해서, 본 설계 방법의 타당성과 정확성에 대해서 생각하였다.

II. 안테나 설계

2-1 안테나 구조

본 논문에서의 슬롯 배열 모노펄스 안테나는 구조적으로 복사면, 급전기, 모노펄스 비교기로 구성 되어 있다. 안테나 복사면은 그림 1과 같이, 윗면에 슬롯이 있는 복사 도파관으로 구성되어 있으며, 각 슬롯은 관내파장(Guided Wave Length)의 1/2 간격으로 배치되어 있다. 그리고 급전구조에서도 같은 크기의 도파관을 사용하기 위해서, 급전슬롯이 복사도파관 관내파장의 1/2 간격으로 배치되어 있다. 따라서 안테나 복사면에서는 안테나 소자가 가로 세

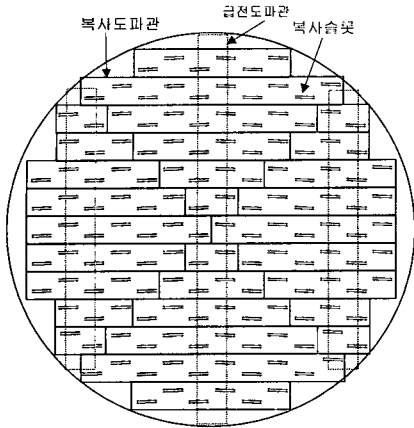


그림 1. 안테나 복사면 구조
Fig. 1. The structure of antenna radiation aperture.

로 방향에 대해 모두 같은 간격으로 배치되어 있는데, 이를 정방 배열(Square Array)이라고 부른다.

각 복사도파관은 도파관의 아랫면에 기울어진 슬롯을 통해서 급전되는데, 그림 2에서와 같이 급전도파관은 복사도파관 아래에 수직으로 놓여서 1개의 급전도파관에 의해 여러개의 복사도파관이 급전된다. 본 논문에서는 2축 모노펄스 구조이기 때문에, 안테나 복사면은 4개의 분면로 나누어져 있으며, 각 복사분면은 1개의 급전도파관에 의해서 급전된다. 또한 각 급전도파관은 다시 기울어진 슬롯에 의해서 급전되어서, 각각의 안테나 분면은 그림 2에서와 같이 1개의 도파관으로 급전되는데, 이 도파관은 모노펄스 비교기로 연결된다.

모노펄스 비교기는 4개의 안테나 분면 신호를 처리해서 1개의 합단(Σ , Sum port)과 2개의 차단(Δ , Difference port)을 만드는 기능을 한다. 본 논문에서는 그림 3에서와 같이 4개의 도파관 메직티(Magic T)를 사용해서 모노펄스 비교기 회로를 구성하였으며, 최종출력은 3개의 도파관 출력단으로 구성되어 있다.

2-2 모노펄스 축 구조

모노펄스 방법은, 일반적인 안테나의 각도 분해능이 3dB 빔폭 정도인데 비해, 대칭적인 두 개의 안테나 빔을 비교 이용해서 안테나의 각도 분해능을 대폭적으로 높이는 방법이다^{[8],[9]}. 일반적인 모노펄스

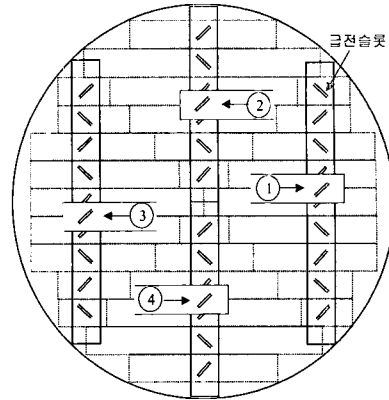


그림 2. 안테나 급전 구조
Fig. 2. Antenna feeding structure.

스 안테나의 합단과 차단의 수신 패턴은 그림 8과 같다. 안테나의 3 dB 빔폭 내에서는 수신 각도에 따라 합단과 차단 신호의 비(Δ/Σ)가 각기 다르고, 좌우 방향에 따라 Δ/Σ 의 위상도 180도 차이를 보인다. 따라서 모노펄스 방법에서는 수신 채널에서 합단과 차단 신호의 비와 위상에 따라, 신호원의 각도 위치를 정밀하게 추정할 수 있다.

일반적으로 모노펄스 축은 전자파 편파(Polarization)와 수평/수직인 방향을 사용하는 십자형 모노펄스 축구조를 사용한다. 그러나 본 논문에서는 그림 1,2에서와 같이 안테나 복사면이 $\pm 45^\circ$ 방향으로 나누어져 있다. 이러한 X-형 모노펄스 구조에서는 십자형 모노펄스 구조와는 달리, 2개의 축 방향에 대해서 안테나 패턴과 모노펄스 기울기가 동일하며, 방위각(0°) 및 고각(90°) 방향에 대한 모노펄스 기울기가 낮기 때문에 고각 방향의 클러터 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 X-형 구조는 십자형 모노펄스 구조에 비해 복사면 구조가 더 복잡하며, 4개의 안테나 분면에 대한 안테나 구조의 대칭성이 적다. 또한 4개의 안테나 분면은 안테나 후면에서 그림 3에서와 같은 메직티를 이용한 모노펄스 비교기 구조에 연결되어 합/차단을 구성하기 때문에, 하나의 메직티로 연결되는 두 복사면에서의 총 복사 파워량은 같아야 한다. 따라서 본 논문에서는 인접한 각 안테나 분면의 구조와 복사슬롯의 수는 다르지만, 각 분면에서 복사되는 파워량이 같도록 안테나 복사면의 분포함수를 조절하였다.

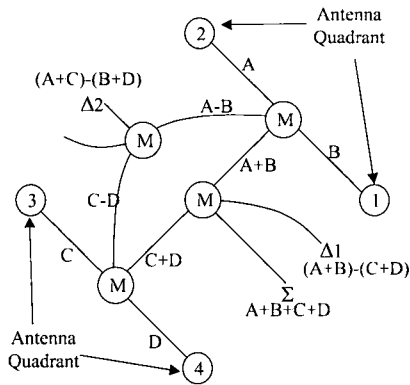


그림 3. 모노펄스 비교기 구조
Fig. 3. Monopulse comparator.

2-3 복사면 분포함수 설계

안테나 복사면 설계에서는 부엽준위 특성을 얻기 위해서, 복사량 분포를 조절하는데, 이에 는 테일러 (Taylor) 등의 여러 가지 방법이 쓰인다. 그러나 안테나 배열 소자의 수가 적거나, 복사면의 복사소자 분포가 원형에 가깝지 않을 경우는, 흔히 쓰이는 연속함수 형태의 분포함수가 적합하지 않다. 또한 본 논문에서처럼 각 복사면의 복사량이 같도록 조절하여야 하는 경우는, 일반적인 복사면 분포함수 대신에 반복법(Iteration Method)에 의한 복사면 분포 설계 방법이 유리하다.

우선 안테나 복사면의 초기 분포는 흔히 쓰이는 아래의 연속함수 분포를 사용하였다.

$$f(r) = C_0 + (1 - C_0)(1 - (r/r_0)^2)^p \quad (1)$$

여기서 r_0 는 안테나의 반지름이다. 안테나 중앙에서는 복사소자의 가중치가 1이며, 안테나의 테두리 부근에서는 가장 작은 값인 C_0 로, 대체로 -10 dB에서 -20 dB 정도의 값을 사용한다. 그리고 지수 p 는 1.5에서 2.5 정도의 값을 사용한다. 이러한 복사면 설계에서 C_0 값이 너무 작거나, p 값이 너무 클 때에는 부엽준위를 낮추기에는 유리하나, 안테나 빔폭이 넓어지고, 안테나 복사면의 효율이 떨어진다. 또한 인접한 복사소자 사이의 가중치 차이가 크기 때문에, 안테나 배열 합성 최적화가 힘들어지며, 안테나의 대역폭도 좁아지는 효과가 생긴다.

일반적인 모노펄스 안테나에서는, 본 논문에서와 같이 복사면의 모든 구조가 안테나의 중심에 대해서 점대칭을 이루도록 설계된다. 이는 안테나가 목표물을 정면으로 바라볼 때에 안테나의 대칭성에 의해서, 안테나 차단(Δ_1, Δ_2)의 신호가 영이 되도록 하기 위함이다. 본 논문에서도, 그림 1에서와 같이 점대칭성이 있으며, 안테나 복사면은 좌우와 상하 방향으로 대칭성이 있다. 그러나 안테나 복사면은 45° 방향으로 나누어지므로, 안테나 복사면 분포 설계를 위해서는 이러한 점대칭성과 좌우 상하 대칭성을 고려함과 동시에 각 복사 분면에서의 복사 파워량이 같도록 조절하여야 한다. 복사면 분포 설계 단계에서의 안테나 복사면의 좌우 및 상하 방향 대칭성은 대략적인 것이며, 안테나 배열의 합성에서 슬롯은 도파관의 중심선을 기준으로 아래/위로 번갈아서 놓여지기 때문에, 이후에 세부적인 대칭성은 없어지게 된다.

안테나 복사소자의 가중치 초기값이 정해지면, 이 값에 따라 안테나 복사 패턴은 일반적인 방법에 따라 계산될 수 있다. 본 논문에서와 같이 안테나 복사 소자가 많은 경우는 배열요소(Array Factor)로 안테나 복사패턴을 대신할 수도 있다. 이렇게 계산되는 복사 패턴에서 방위각, 고각, 45° 방향에 대한 안테나의 빔폭 부엽준위를 계산하여 복사면 최적화 작업의 대상으로 이용한다. 그리고 안테나 복사면은 기본적으로 아래와 같은 원칙에 따라 최적화한다.

- 1) 무작위수를 이용해서 가중치를 무작위로 변화시킨다.
- 2) 안테나 각 방향에 대한 안테나의 빔폭과 부엽준위를 계산한다.
- 3) 안테나 패턴 특성이 개선되지 않으면 가중치 변화 이전의 값으로 가중치를 환원한다.
- 4) 목표로한 안테나의 패턴이 확보될 때까지 1)~3)의 과정을 반복 수행한다.

무작위수를 이용한 가중치 변화를 위해서는, i -번째의 반복의 경우 아래와 같이 가중치를 변화시킨다.

$$w_{kn} \leftarrow w_{kn} + R_i R_{kn}, \quad k=1, 2, \quad n=1, \dots, N_k \quad (2)$$

$$w_{3n} = w_{1n} \quad (3)$$

$$w_{4n} = w_{2n} \quad (4)$$

여기서 w_{kn} 은 k 분면의 n 번째 복사소자이며, N_k 는 k 분면의 총 슬롯 수이다. R_i 와 R_{kn} 은 무작위수로 R_{kn} 는 k 분면 n 번째 복사소자에 대한 -1 과 1 사이의 무작위수이며 무작위수 R_i 는 가중치 변화의 과정에서 가중치의 변화범위를 제한하는 값이다. 가중치의 변화범위를 일정하게 고정하고 본 논문에서와 같은 최적화를 시도할 경우는, 가중치의 변화가 너무 커서 안테나 복사패턴의 개선이 거의 일어나지 않거나, 어느 정도의 개선이 있더라도 일정수준의 개선 후에는 더 이상의 복사패턴 개선이 일어나지 않는다. 이러한 이유 때문에 가중치의 변화범위를 정하기가 힘들고, 최적화 단계에 따라 변화범위를 조절하여야 하는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 무작위수 R_i 를 이용해서 가중치의 변화범위도 무작위로 설정되도록 하였다. 본 논문에서는 R_i 값을 $\pm 2\%$ 이내의 작은 무작위수로 하였다.

식 (2)~(4)에서는 복사 분면 1,2에 대해서 무작위수로 가중치를 변화시켰기 때문에, 좌우 상하 방향에 대한 대칭성은 고려가 되지 않았다. 따라서 위식의 가중치 변화 후에, 좌우 상하에 대칭적으로 위치한 슬롯에 대해서는 가중치가 같도록 하여야 한다. 결과적으로 그림 1과 같이 150개의 복사 소자가 있는 복사면은 그림 4와 같이 41개의 독립적인 가중치로 나타내어질 수 있다.

복사소자 가중치의 변화 후에는 가중치를 아래와 같이 한번 더 수정하여야 한다.

$$w_{2n} = w_{4n} \leftarrow w_{2n} \times \left(\frac{\sum_k^{N_1} w_{1k}}{\sum_k^{N_2} w_{2k}} \right) \quad (5)$$

이렇게 함으로써, 각 복사분에서 복사되는 파워

0.0962	0.1212	0.1263				
0.1419	0.1338	0.1069	0.0765	0.0799		
0.3166	0.2371	0.1737	0.1558	0.0763	0.0769	
0.5765	0.4357	0.3463	0.1877	0.1284	0.0815	
0.7937	0.6842	0.4719	0.3067	0.1715	0.1062	0.0921
0.9949	0.7996	0.6045	0.3912	0.1849	0.1058	0.0963
1.0000	0.8641	0.6599	0.4069	0.2529	0.1546	0.0924

그림 4. 복사면 분포 설계 결과

Fig. 4. Radiation aperture design result.

량은 같아지기 때문에, 위에서 설명한 바와 같이, 안테나 후면에서의 모노펄스 비교기 회로 설계가 훨씬 편리하게 된다.

2.4 슬롯 특성 분석 방법

도파관 광벽 슬롯 배열 안테나의 설계 방법으로 1980년대 이후에는 Elliott의 방법이^{[1],[4],[5]} 많이 쓰여오고 있다. 이 방법에서는 단일 슬롯의 공진 특성을 확보하여, Stegen의 방법^[1] 따라 슬롯의 공진 길이(Resonant Length)와 공진입력저항(Resonant Input Impedance)을 간단한 형태의 수식으로 표현하여 배열 설계에 사용한다. 그러나 본 논문에서와 같이 도파관의 높이가 표준형의 1/4 정도밖에 되지 않는 경우에는 도파관 내에서의 슬롯에 의한 반사계수와 전달계수의 공진 특성이 크게 차이가 있고, 슬롯의 도파관 중심에서 벗어나 거리(그림 5의 d)에 따라 슬롯길이에 대한 슬롯 특성이 다르게 된다.^[3] 따라서, 도파관의 높이가 표준 도파관의 1/4 정도인 낮은 도파관에서는, 슬롯특성을 간단한 수식으로 표현하기가 힘들며, 이러한 이유 때문에 본 논문에서는 모멘트법을 이용하여, 슬롯 배열합성(Array Synthesis) 과정에서 직접 슬롯특성을 계산하여 사용하였다.

본 논문에서는 도파관 슬롯에 대한 모멘트법 분석 방법으로 Josefsson의 방법을^[2] 수정하여 사용하였다. 이 방법에서는 전영역 기저함수(Entire Domain Basis Function)를 이용해서 그림 5의 경계면 B_1 과 B_2 에서 경계조건을 적용하여 슬롯에 의한 영

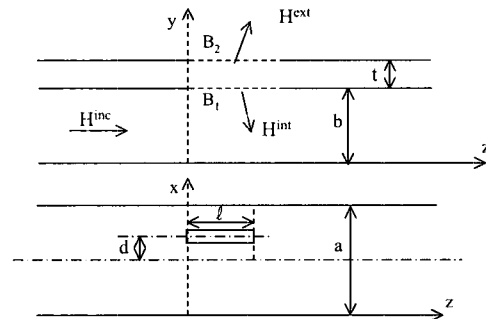


그림 5. 도파관 슬롯의 구조

Fig. 5. The structure of waveguide slot.

향을 분석한다. 본 논문에서는 경계면 B_1 에 의한 모멘트 행렬은 Josefsson의 방법 대신에, 푸리에 변환을 하지 않고 공간영역(Space Domain)에서 직접 계산하였다. 또한 경계면 B_1 에 대한 모멘트 행렬은 슬롯 길이만의 함수이므로, 미리 계산해 두고 내삽법(Interpolation)을 사용하여 슬롯 특성 분석 시간이 많이 줄었다. 이러한 방법으로 작성된 프로그램에서 한 개의 슬롯 특성을 분석하기 위해서, 펜티엄 III 650 MHz CPU 컴퓨터에서 평균 0.08초 정도 소요 되는 것으로 나타났다.

이러한 슬롯구조의 모멘트법 분석에 있어서, 슬롯 모양을 직사각형으로 가정하지만, 실제로 제작되는 대부분의 슬롯 안테나에서는 가공상의 문제로 인해서 슬롯의 양 끝은 원형을 이루게 된다. 이러한 구조적인 차이 때문에, 슬롯 면적이 같게 하거나^[7], 둘레 길이가 같게 하는 방식으로 슬롯 길이를 보정해서 사용한다. 또한 이러한 방법은 슬롯폭(Slot Width) 방향에 대한 전자기장의 분포 모델링 및 도파관 모드(Waveguide Mode)의 수렴성 조절에 따라 약간의 오차요인을 내재하고 있다. 따라서 모멘트법으로 작성된 슬롯분석 프로그램은 실제로 응용할 때에는 실험적인 방법으로 모멘트법의 해석결과와 원형끝 구조의 실제 슬롯 특성 간의 보상 길이에 대해서 검토할 필요가 있다. 본 논문에서는 슬롯 면적이 같게 하는 방법의 길이 보정치보다 30% 정도 짧은 보정 길이를 사용하였다.

2-5 슬롯 배열 설계

도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 안테나의 경우는 안테나 소자간의 상호결합 효과가 크기 때문에, 배열의 설계에 있어서 반드시 상호결합 효과를 고려하여야 한다. 이러한 방법으로는 아래와 같은 Elliott의 수식을 이용할 수 있다^{[1],[4],[5]}.

$$\frac{Y_n^a}{G_0} = K_1 f_n \sin k \ell_n \frac{V_n^s}{V_n} \quad (6)$$

$$\frac{Y_n^a}{G_0} = \frac{K_2 f_n^2}{Z_n^a} \quad (7)$$

$$K_1 = -j \left[\frac{8}{\pi^2 \eta G_0} \frac{a/b}{\beta/k} \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{292(a/b)}{0.61\pi(\beta/k)} \quad (9)$$

$$f_n = \frac{\cos \beta \ell_n - \cos k \ell_n}{\sin k \ell_n} \sin \frac{\pi x_n}{a} \quad (10)$$

$$Z_n^a = \frac{K_2 f_n^2}{Y_n/G_0} + \sum_{m=1}^N \frac{V_m^s \sin k \ell_m}{V_n^s \sin k \ell_n} Z_{nm} \quad (11)$$

여기서 β 는 도파관 전파상수이고, Y_n/G_0 은 모멘트법으로 계산된 슬롯의 정규화(Normalize)된 admittance이며, V_n 은 n 번째 슬롯이 속한 복사도파관의 도파관 가중치이다. 그리고 식 (11)에서 Z_{nm} 은 n 번째 슬롯과 m 번째 슬롯의 상호결합 임피던스(Impedance)이며, Z_{nn} 은 영이다. 위식에서 V_n^s 는 n 번째 슬롯의 전압인데, 2-3절에서 설명한 복사소자 가중치에 대응하는 값이다. 따라서 배열 설계를 위해서는 복사면의 여러 슬롯의 길이 ℓ_n 과 도파관 중심에서 벗어난 거리 d_n 를 조절하여, V_n^s 값이 복사소자 가중치와 같아지도록 하여야 한다. 이러한 ℓ_n 과 d_n 의 조합을 찾기 위해서는 여러 가지 최적화 방법이 쓰일 수 있지만, 본 논문에서는 모든 슬롯에서 순서대로 V_n^s 값이 맞도록 ℓ 과 d 를 조절하는 과정을 반복적으로 수행하여 모든 슬롯에서 V_n^s 값이 설계한 복사 가중치와 같아지도록 하였다.

2-6 급전구조 설계

안테나의 급전을 위해서는, 그림 2에서와 같이, 복사도파관의 후면에서 그림 6과 같은 구조의 기술

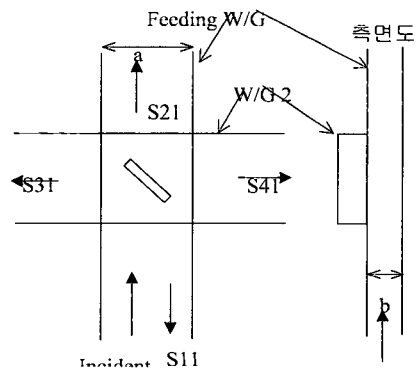


그림 6. 도파관 급전 슬롯
Fig. 6. Structure of feeding slot.

어진 슬롯을 이용해서 각각의 도파관으로 파워를 분배하게 된다. 기울어진 슬롯을 이용한 급전구조의 설계에 있어서는 대체로 인접한 슬롯간의 상호결합을 고려하지 않는다. 따라서 급전구조 설계에 있어서는, 기울어진 슬롯의 특성 데이터를 직렬 저항 성분으로 모델링하고, 각각의 복사도파관에서 복사되는 파워의 총합의 비(Ratio)에 따라 파워가 분배되도록 회로적인 개념에 따라 설계한다.

기울어진 슬롯은 슬롯 길이와 기울어진 각도를 설계 인자로 가지며, 회로적인 의미에서 직렬(Series) 저항(Resistance) 소자로 표현된다. 그리고 기울어진 슬롯에서는 공진길이가 기울어진 각도에 크게 민감하지 않으므로, 제작 실험을 통하거나 상용 FEM 프로그램 분석을 통해서 슬롯 특성을 쉽게 분석할 수 있다. 본 논문에서의 경우는 도파관 높이가 낮아서 제작 및 측정에서의 오차에 민감하므로, 상용 FEM 프로그램을 사용하여 슬롯 특성을 분석하여, 공진길이와 공진저항 값을 간단한 다항식으로 추출하여 사용할 수 있다.

기울어진 슬롯을 이용해서 종방향 슬롯이 있는 복사도파관을 급전할 때에, 각각의 복사도파관은 식 (12)와 같이 1개의 직렬 저항 소자로 표현된다.

$$\frac{r}{R_0} = \frac{S_{11}}{1 - S_{11}} G^{\text{sum}} \quad (12)$$

여기서 G^{sum} 은 해당 복사 도파관에 있는 모든 슬롯에서의 $V_n^2 Y_n / G_0$ 값의 합이며, S_{11} 은 그림 6과 같은 구조에서 기울어진 슬롯만이 있을 때의 S_{11} 파라미터이다. 그림 2, 3에서와 같이 기울어진 슬롯이 있는 급전 도파관을 모노필스 비교기에 연결하기 위해서 다시 기울어진 슬롯을 사용하여 급전할 경우는, 그림 6과 같은 급전 구조를 가정할 때, 각각의 출력단 방향에서는 복사도파관의 복사 파워량이 식 (12)의 직렬 저항 성분에 비례한다. 그러나 2개의 출력단 3, 4로 나누어지는 파워량은 각 출력단의 등가 admittance에 비례하므로, 이 경우는 각 출력단 방향의 직렬 저항 성분의 총합에 반비례한다. 이를 고려하면 급전부 구조는 회로적인 개념으로 쉽게 설계될 수 있다.

III. 설계 예 및 측정 결과

위에서 설명한 방법에 따라, 본 논문에서는 안테나의 직경이 10.9파장인 Ku-밴드 주파수 대역의 도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 모노필스 안테나를 설계하였다. 이를 위해서 폭이 0.688파장, 높이가 0.1파장인 도파관을 기본 도파관으로 사용하였으며, 이에 따라 복사면은 그림 1과 같이 150개의 슬롯을 배치하였다. 안테나 복사면은 좌우 상하 대칭성을 갖도록 하기 위해서, 그림 1의 전체 안테나 복사면 중에서 1/4에 해당하는 우측상단에 대해서 그림 4에서와 같이 복사소자 가중치를 설계하였다. 그림 4에서 각각의 가중치는 좌우 상하 대칭성에 의해 4개 슬롯의 가중치를 대표한다. 그러나 그림 1의 안테나 복사면 구조와 그림 4의 복사소자 구조를 비교하면, 그림 4의 마지막 행(Row)은 전체 안테나의 가운데 행에 해당함을 알 수 있다. 따라서 그림 4의 마지막 행은 좌우 대칭성에 의한 2개의 슬롯에 대한 가중치 값이다. 복사면 최적화를 위해서, 식 (1)의 공식에 따라 가중치 초기 값을 설정하고, 복사면 중앙의 최대 가중치를 1로 할 때 최소 가중치의 값이 전압 (Voltage) 기준으로 0.276, 파워 기준으로 0.076이 되도록 하여 최적화 방법을 수행하였다. 그림 4에서 파워 기준의 최적화된 복사면 가중치 설계 결과를 보였으며 그림 7, 8에서 예상 안테나 패턴을 보였다.

그림 9, 10, 11에서는 45° 방향과 방위각(0°), 고각(90°) 방향에서의 안테나 측정 패턴을 보였다. 표 1에서 안테나의 설계치와 측정치를 보였는데, 설계치

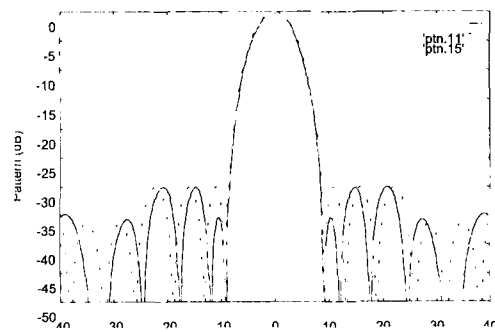


그림 7. 안테나 복사 패턴(이론)

실선 : 방위각($\phi=0^\circ$);
점선 : 고각($\phi=90^\circ$)

Fig. 7. Radiation pattern (Theory), solid line : azimuth, dotted line : elevation.

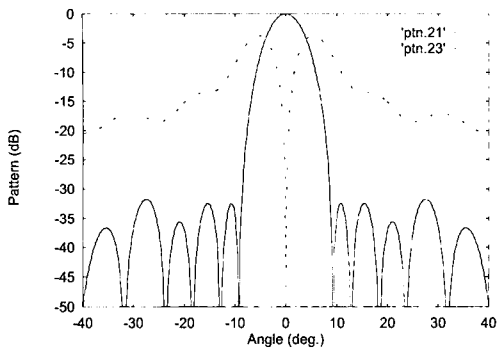


그림 8. 안테나 복사패턴 (이론, $\phi=45^\circ$)
 Fig. 8. Radiation pattern (Theory, $\phi=45^\circ$).

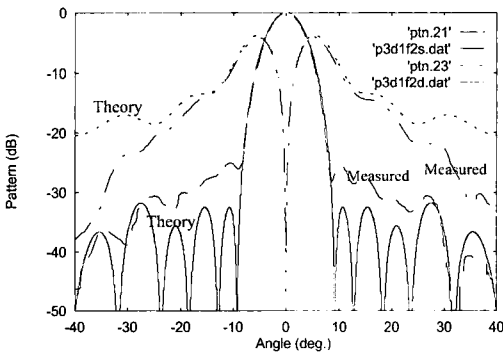


그림 9. 안테나 복사패턴($\phi=45^\circ$)
 Fig. 9. Radiation pattern($\phi=45^\circ$).

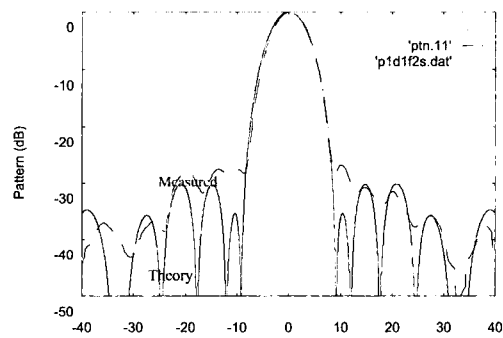


그림 10. 안테나 복사 패턴(방위각)
 Fig. 10. Radiation pattern(Azimuth).

와 0.3° 정도의 차이를 보임을 알 수 있다. 그리고 부엽준위는 30 dB를 기준으로 설계되었는데, 측정에서는 25~27 dB 정도의 값을 보였다. 이러한 차이는 설계적인 오류와 기계적인 가공오류에서 기인할

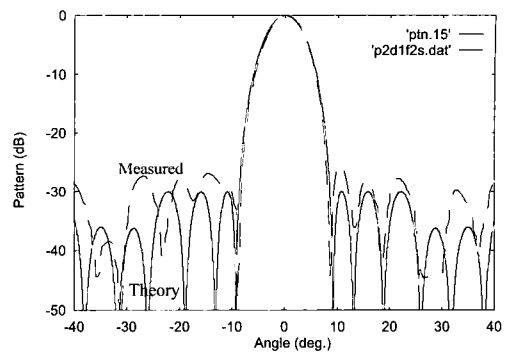


그림 11. 안테나 복사 패턴(고각)
 Fig. 11. Radiation pattern(Elevation).

표 1. 3 dB 빔폭에 대한 설계치와 측정치의 비교
 Table 1. Comparison between designed data and measured data for 3 dB beamwidth.

편파	45°	방위각	고각
설계치(°)	6.7	6.6	6.9
측정치(°)	6.5	6.5	6.6

수 있는데, 제작에서의 허용 가공오차는 0.002파장 정도였다.

안테나의 패턴 측정은 전파 무반사실에서 수행하였으며, 안테나 이득은 표준 혼(Horn) 안테나와 측정 안테나의 수신 세기를 비교하여 측정하였다. 이 측정에서 안테나 이득은 28.3 dB였으며, 안테나의 지향성(Directivity)이 29.6 dB이므로, 이 안테나의 효율은 74 % 정도임을 알 수 있다. 그리고 본 안테나는 협대역(Narrow Bandwidth)에서 사용되고 입력

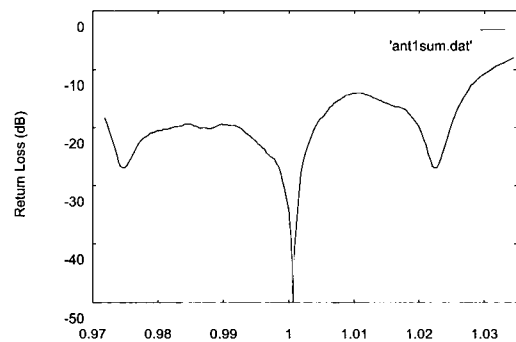


그림 12. 반사 손실
 Fig. 12. Return Loss.

부정합(Mis-Match)에 의해서 모노필스 기울기의 변화와 수신부 손상이 있을 수 있기 때문에, 조율나사(Tuning Screw)를 이용해서 주어진 주파수에서 입력 정합 특성이 조율 되었다. 따라서 그림 12의 입력정합 특성은 중심주파수에서 매우 좋은 특성을 가지고 있다.

IV. 결론 및 토의

본 논문에서는 X-형 모노필스 축 구조를 가지는 도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 모노필스 안테나의 설계에 대해서 생각하였다. X-형 모노필스 축 구조 구현을 위한 방법과 무작위수를 이용한 안테나 패턴의 최적화 방법을 제시하였으며, 도파관 슬롯의 모멘트법 해석 방법과 슬롯배열의 설계, 급전구조의 설계에 대해서는, 기존에 발표된 방법들을 수정 조합하여 안테나를 효율적으로 설계할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 방법에 따라 실제로 안테나를 제작하여, 안테나의 이득이 28.3 dB, 부엽준위가 25~27 dB임을 확인하였다. 안테나 효율은 74 % 정도로 도파관 광벽 종방향 슬롯 배열 안테나의 평균적인 수준이다. 또한 부엽준위는 이론치에 비해 3~5 dB 감소하였는데, 이는 도파관의 높이가 낮아서 가공오차 및 알루미늄 접합 과정에서 오차에 민감한 점을 감안하면, 적절한 수준으로 여겨진다.

참 고 문 헌

[1] R. S. Elliott, *Antenna Theory and Design*, Pren-

tice-Hall, 1981

- [2] Lars G. Josefsson, "Analysis of longitudinal slots in rectangular waveguides", *IEEE Trans. on AP*, vol. AP-35, pp. 1351-1357, Dec. 1987.
- [3] G. J. Stern and R. S. Elliott, "Resonant length of longitudinal slots and validity of circuit representation : theory and experiment", *IEEE Trans. on AP*, vol. AP-33, pp. 1264-1271, Nov. 1985.
- [4] R. S. Elliott and L. A. Kurtz, "The design of small arrays", *IEEE Trans. on AP*, vol. AP-26, pp. 214-219, March 1978.
- [5] R. S. Elliott, "An improved design procedure for small arrays of shunt slots", *IEEE Trans. on AP*, vol. AP-31, pp. 48-53, Jan. 1983.
- [6] 나형기, 박공만, 이익규, 강광희, "도파관 광벽 슬롯 배열 모노필스 안테나 개발", 1998년 춘계 마이크로파 및 전파 학술대회, 서울대학교, pp. 301-304, 1998년 5월 23일
- [7] P. N. Richardson and H. Y. Yee, "Design and Analysis of Slotted Waveguide Antenna Arrays", *Microwave Journal*, pp. 109-125, June 1988.
- [8] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House 1984.
- [9] 박공만, 김이한, 나형기, 나영진, "모노필스 기법에 의한 각도 추적 방법 및 구현", 제 2회 시험평가 기술 심포지움 논문집, 국방과학연구소, pp. 262-282, 1999년 9월 10일

나 형 기



1991년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1993년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
 1996년 1월~현재: LG이노텍 연구소 선임연구원, 책임연구원

[주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석

박 창 현



1997년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 1월~현재: LG이노텍 연구소 주임연구원
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 수치해석