
구형 도파관 측벽 공진 슬롯의 특성 해석

박정호*, 김민준**

Analysis of Resonant Slots in the Narrow Wall of a Rectangular Waveguide

Jeong-Ho Park*, Min-Joon Kim**

이 논문은 1998년도 동의대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

요약

구형도파관 slot 안테나는 그 구조가 간단하고, 고효율, 고신뢰성 및 소형 제작이 가능한 이유로 많은 Radar 분야와 마이크로파 통신 분야에서 그 응용 분야가 확대되고 있다. 도파관 벽에 형성된 slot은 도파관 내부 도체의 전류를 차단하여 전자파를 자유공간으로 복사한다. 그러므로 슬롯의 경사각도, 절삭깊이, 슬롯 폭, 슬롯 길이 등이 안테나 특성 변화의 중요한 변수가 된다. 이러한 slot에 대한 이론적 해석의 어려움으로 인하여 주로 실험적으로 측정된 데이터를 이용한 설계와 제작이 이루어져 왔다.

본 논문에서는 slot의 전계 분포로부터 복사되는 복사전력 및 모드 전류 계산에 의해 slot 어드미턴스를 구하고, 공진길이 및 절삭깊이, 경사각도 등을 계산할 수 있는 표를 완성함과 더불어 동일 slot을 유한요소법을 사용하는 상용 소프트웨어(HFSS)를 사용하여 해석하는 방법을 동시에 수행하여 해석 결과를 기존 문헌의 측정 결과와 비교함으로써 적절한 해석 방법을 찾아내고자 한다.

Abstract

Rectangular waveguide slot antenna which has simple structure, high efficiency, high trust and small size, is extending in a field of application such as many Radar and Microwave communication. A slot cut into a wall of waveguide is propagated electromagnetic wave to free space it interrupts the flow of current inner conductor of waveguide. Therefore incident of slot, cutdepth, width, length, i.e. are important parameter of

* 동의대학교 대학원 전자공학과

** 동의대학교 전자공학과 교수

접수일자 : 1998년 11월 17일

characteristic change of the slot antenna. Result from difficulty of theoretical analysis about slot frequently experimental measured data useful design and manufacture have been accomplished.

In this paper, we find the suitable method of analysis that compare two analysis results with measured result of established literature - admittance of slot be solved by propagated power from electric field distribution of slot and mode current computation and accomplishment of computable chart which has resonant length and cutdepth, incident of slot, i.e. and use the HFSS which applied finite-element method obtain equal slot analyzed method.

1. 서론

구형도파관 슬랏은 목적에 따라 E면 또는 H면에 홈을 파서 슬랏을 만든다. E면에 슬랏을 절삭하면 제작이 쉽고, 안테나 크기를 줄일 수 있으며 슬랏의 경사각도와 절삭깊이를 적당히 조절하면 낮은 정재파 특성과 높은 지향성을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 유한 요소 해석 프로그램인 HP사의 High Frequency Structure Simulator (HFSS)를 이용하여, 측정값이 알려진 기존 문헌의 구형도파관 측벽 공진 슬랏의 어드미턴스[5][7]를 계산하였으며, 계산 결과를 측정값과 비교하여 계산값의 타당성을 확인한 후, Das[10]의 공진 컨덕턴스 식으로부터 계산된 슬랏 공진 컨덕턴스를 기초로 하여 공진 컨덕턴스를 실현하는 각 슬랏의 설계 제원(슬랏의 경사각도, 절삭깊이, 슬랏의 길이, 슬랏의 폭)을 결정하였다.

2. 구형도파관 측벽 공진 슬랏의 방사 이론

단일 모드의 전자파가 진행하는 도파관은 주파수와 도파관의 물리적 구조에 의해 결정되는 전파상수(propagation constant)와 특성임피던스를 갖는 전송선로에 의해 등가적으로 나타낼 수 있다.

구형도파관의 기본 모드(dominant mode)인 TE_{10} 모드 전파와 관련된 도파관 내벽의 표면전류는 그림 2.1과 같다.

표면 전류밀도 \vec{j} 는

$$\vec{n} \times \vec{H} = \vec{j} \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서,

\vec{n} : 도파관 내벽의 단위 법선 벡터

\vec{j} : 표면 전류 밀도

\vec{H} : 도파관 내벽 표면에서의 자계

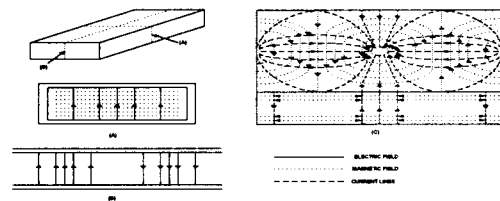


그림 2.1 TE_{10} 모드에서 구형도파관 전파에 대한 표면전류밀도

(A) 단면도 (B) 측면도 (C) 표면 분포

Fig. 2.1 Surface current distribution for rectangular waveguide propagation TE_{10} mode

(A) Cross-sectionak view

(B) Longitudinal view (C) Surface view

도파관의 E면 또는 H면에 형성된 슬랏은 그 형태에 따라 그림 2.1과 같은 전류의 흐름에 변화를 주게 되며, 도파관 외부로 전자파 에너지가 결합되어 방사 특성을 갖게 된다.

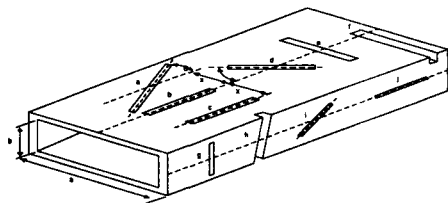


그림 2.2 구형도파관 벽에서 방사하는 슬랏

Fig. 2.2 Radiating slots cut in the wall of a rectangular waveguide.

그림 2.2의 슬롯 b, g를 제외한 모든 슬롯은 도파관 축과 횡단 방향의 전류의 흐름을 차단하여 방사 특성을 나타내는 방사 슬롯들의 형태를 나타내며, 슬롯 b, g는 전류의 흐름과 나란하여 전류분포에 영향을 주지 않는 비방사 슬롯의 형태를 나타낸다.

그림 2.2의 슬롯 c, h, i, j는 횡방향 전류에 대해서만 영향을 주므로 병렬 소자로 나타낼 수 있으며, 슬롯 d는 축방향 및 횡방향 전류와 결합하나 도파관 축을 기준으로 슬롯 양쪽의 횡방향 전류의 방향이 반대가 되므로 횡방향 전류의 영향이 서로 상쇄되어 축방향 전류만에 의한 직렬 소자로서 나타낼 수 있다.

슬롯 a는 축방향과 횡방향 모두의 전류와 결합하므로 직·병렬 소자에 의해 나타낼 수 있으며, 슬롯 e, f는 축방향 전류와 결합하여 직렬소자로 나타낼 수 있다.

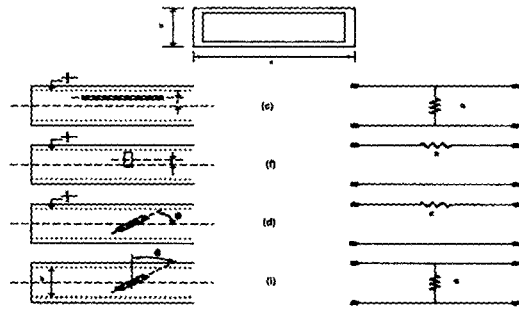


그림 2.3 구형도파관 측벽 슬롯의 등가회로
Fig. 2.3 Equivalent-network representations of slot radiators

슬롯 형태에 따른 등가회로는 그림 2.3과 같다. 여러 형태의 슬롯에 대한 공진시, 즉 서셉턴스가 zero가 될 때 컨덕턴스에 대한 계산은 Stevenson[3]에 의해 계산되었다.

그림 2.4는 도파관 측벽에 형성된 단일 슬롯의 형태를 나타낸 것이다.

그림 2.4에서 도파관 상·하에 형성된 슬롯에 의해 발생하는 등가 직렬성분은 설계시 일반적으로 무시된다.

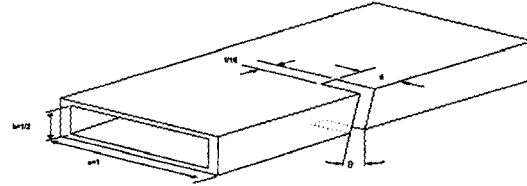


그림 2.4 RG52/U 구형도파관의 측벽 슬롯
Fig. 2.4 Edge slot in rectangular waveguide : RG52/U waveguide

3. HFSS에 의한 측벽 공진 슬롯의 특성 해석

유한요소법을 사용하는 Hewlett Packard사의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 사용하여 도파관 슬롯의 특성을 해석한 경우가 발표된 것이 없어, 본 논문에 HFSS 사용 가능성 여부를 판단하기 위해서 실험값이 명시된 문헌의 도파관 슬롯을 해석하여 실험값과 계산값을 비교하였다. 그림 3-1은 시뮬레이션에 사용된 도파관 슬롯과 경계조건을 나타낸다.

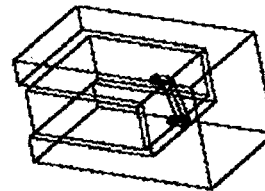


그림 3.1 HFSS 해석을 위한 구형도파관 공진 슬롯 모델링
Fig. 3.1 The rectangular waveguide resonant slot modeling for HFSS analysis

사용도파관은 WR90(22.86×10.16mm, 두께 1.27mm)이며, 경사각도 20°에서 절삭깊이 3.5mm(도파관 외벽으로부터의 깊이), 폭 1.6mm의 슬롯을 8.4GHz에서 9.4GHz까지 0.2GHz 간격으로 산란행렬을 구하였다. 이때 슬롯에 의한 전자파는 슬롯을 통하여 자유공간으로 방사하므로 유한요소 해

석법을 적용하기 위해서는 무한 자유공간을 유한 자유공간으로 전환하여야 한다. 이를 위하여 그림 3.1에서 도파관 외부의 사각형을 무한 자유공간을 수학적으로 구현한 흡수 경계조건을 갖는 경계면으로 설정하였다. 이러한 흡수 경계조건을 사용하기 위해서는 경계면을 방사체로부터 멀리 설정하면 정확한 결과를 얻을 수 있으나 컴퓨터 메모리의 한계로 인하여 제약을 받는다.

본 논문에서는 경계면의 위치를 여러 가지로 변화시키며 계산 결과를 비교하여 오차가 가장 작은 가로 24mm, 세로 1.6 mm, 길이 36.405mm의 흡수면을 찾아내었다.

그림 3.1에서 구형도파관 측벽에 공진 슬롯이 있는 경우에 HFSS를 이용하여 구한 슬롯의 산란행렬(S_{21})를 식 (3.1)과 식 (3.2)에 대입하여 계산한 전송계수 T 와 구형도파관 측벽에 공진 슬롯이 없는 그림 3.1의 도파관과 동일 길이, 동일 재질의 순수한 구형도파관 경우에 HFSS를 이용하여 구한 구형도파관의 산란행렬(S_{21})를 식 (3.1)과 식 (3.2)에 대입하여 계산한 전송계수 T_0 로부터 슬롯에 의한 전송손실을 계산할 수 있으며, 이때 슬롯의 어드미턴스는 다음 식에서 계산할 수 있다.[5]

$$T - T_0 = \frac{2 Y_0}{Y_0 + Y_{in}} \dots\dots\dots(3.1)$$

여기서, Y_0 는 구형도파관의 특성 어드미턴스이며 Y_{in} 은 급전점 어드미턴스이다.

식 (3.1)를 Y_{in} 에 대하여 정리한 후 실수부와 허수부를 분리하면 다음과 같은 관계식이 유도된다.[5]

$$g_{in} = 2 \left(\frac{\cos \psi}{|T|} - 1 \right) \dots\dots\dots(3.2a)$$

$$b_{in} = -2 \frac{\sin \psi}{|T|} \dots\dots\dots(3.2b)$$

$$T = |T| \angle \psi \dots\dots\dots(3.2c)$$

여기서, $|T|$ 와 ψ 는 전송손실의 크기와 위상을 나타낸다.

그림 3.2는 그림 3.1의 슬롯을 슬롯의 경사각도 20°, 절삭깊이 3.5 mm, 슬롯 폭 1.6mm로 고정하

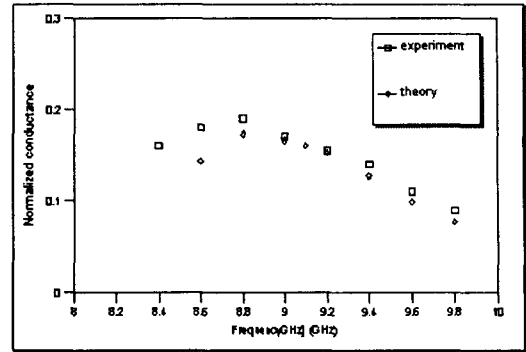


그림 3.2 그림 3.1 슬롯의 정규화 어드미턴스 주파수 특성

Fig. 3.2 Normalized admittance frequency characteristics of Figure 3.1 slot

고, HFSS로 시뮬레이션하여 산란행렬(S_{21})를 구한 뒤 식 (3.1)과 식 (3.2)에 대입하여 주파수의 변화에 따른 슬롯의 정규화 어드미턴스의 변화된 결과를 도출한 것이다.

그림 3.2에서 사각형(\square)은 그림 3.1의 슬롯에 대한 Das 의 측정 결과[10] 이고, 마름모형(\diamond)은 그림 3.1의 슬롯을 HFSS로 시뮬레이션하여 산란행렬(S_{21})를 구한 뒤 식 (3.1)과 식 (3.2)에 의해 구한 값이다. 그림 3.2의 낮은 주파수에서 발생하는 비교적 큰 실측치와 계산치 사이의 오차는 도파관의 길이를 고정시키고 특성을 해석함으로써 도파관의 전기적 길이가 반파장보다 짧아져 슬롯에 의해 발생하는 고차 모드의 영향으로서 도파관의 길이를 증가시켜 시뮬레이션 한 결과 개선됨을 확인할 수 있었다.

슬롯의 절삭 깊이를 3.5mm로 고정하고, 슬롯의 경사각도를 변화시켰을 때의 HFSS로 시뮬레이션하여 산란행렬(S_{21})을 구한 뒤 식 (3.1)에 대입하여 슬롯 어드미턴스의 변화된 결과를 그림 3.3에 도시하였다. 경사각도 14°와 15° 사이에서 서셉턴스가 0이 되므로 14°와 15° 사이에서 슬롯이 공진함을 알 수 있었다.

좀더 정확한 공진 길이를 구하기 위하여 경사각도를 15°로 고정하고, 절삭깊이를 변화시켰을 때 HFSS로 시뮬레이션하여 산란행렬(S_{21})을 구한 뒤

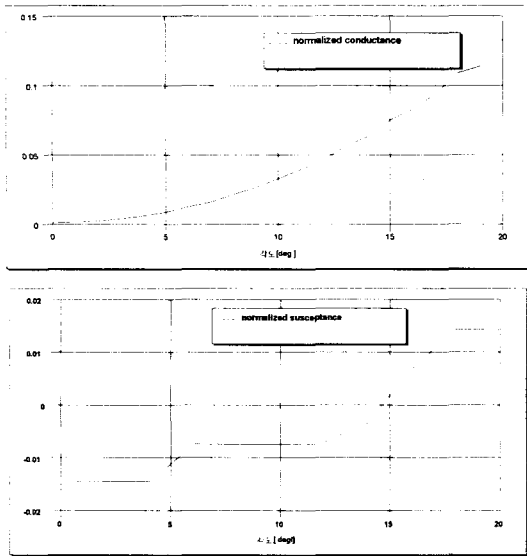


그림 3.3 경사각도에 따른 슬롯 어드미턴스
Fig. 3.3 The slot admittance versus slot inclination

식 (3.1)과 식 (3.2)에 대입하여 정규화 컨덕턴스 (g_{in})와 서셉턴스(b_{in})의 변화된 결과를 그림 3.4에 도시하였으며, 절삭 깊이 3.448mm에서 즉, 0.44469 자유공간 파장에서 공진함을 알 수 있었다.

4. 결론

구형도파관 측벽에 슬롯을 절삭하면 슬롯에 의해 도파관 내벽의 전류가 차단되어 슬롯 표면에 전계가 유기된다. 이때 유기된 전계는 도파관 내부와 외부로 전자파를 발생한다. 이러한 방사 전계계를 유기하는 전계로부터 슬롯 어드미턴스를 계산하기 위한 여러 연구가 수행되어져 왔으나 실제 제작하여 실험한 결과와는 차이가 존재하여 왔다.

본 논문에서는 HFSS 소프트웨어를 실험치가 알려진 슬롯에 적용하여 그 사용 가능성을 확인한 후, 실제 슬롯을 유한요소법으로 해석하였다.

도파관의 측벽에 형성된 슬롯의 산란 행렬로부터 전송손실을 계산하여 각 공진 컨덕턴스별 슬롯 제원(슬롯 경사각도, 슬롯 절삭 깊이, 슬롯 폭, 슬롯 길이)을 제시하여 구형도파관 측벽 슬롯 배열 안테나 설계시 기본 자료로서 본 논문을 활용하

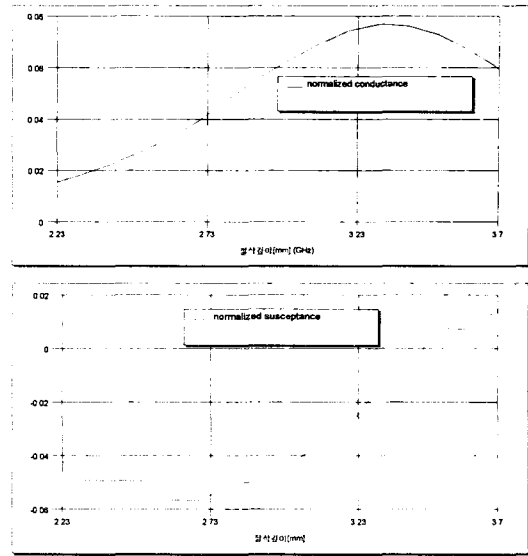


그림 3.4 절삭깊이에 따른 슬롯 어드미턴스
Fig. 3.4 The slot admittance versus slot cut depth

고자 한다.

참고 문헌

- [1] I. P. Kaminow and R. F. Stegen, "Waveguide Slot Array Design," Hughes Aircraft Co. Tech. Mem. 348, 1954.
- [2] W. H. Watson, "Resonant Slots," J. IEE(London), pt. IIIA, vol.93, pp.747-777.
- [3] A. F. Stevenson, "Theory of Slots in Rectangular Waveguides," J. Appl. Phys., vol. 19, pp. 24-38, 1948.
- [4] H. Gruenberg, "Theory of Waveguide-fed Slots Radiating into Parallel Plate Regions," J. Appl. Phys., vol. 23, p. 733, 1952.
- [5] P. Hsu and S. H. Chen, "Admittance and Resonant of Inclined Slots in the Narrow Wall of a Rectangular Waveguide", IEEE Trans., Antennas propagat., vol. AP-37, No. 1, pp. 45-49, January 1989.
- [6] G. J. Stern and R. S. Elliott, "Resonant Length of Longitudinal Slots and Validity of

- Circuit Representation Theory and Experiment", IEEE Trans., Antennas propagat., vol. AP-33, pp. 1264-1271, November 1985
- [7] R. S. Elliott, "Antenna Theory and Design," Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall Publishing, 1981
- [8] R. S. Elliott, "An Improved Design Procedure for Small Arrays of Shunt Slots", IEEE Trans., Antennas propagat., vol, AP-31, No. 1, pp. 148-154, January 1983
- [9] R. S. Elliott and L. A. Kurtz, "The Design of Small Slot arrays", IEEE Trans., Antennas propagat., vol, AP-26, No. 2, pp. 214-219, March 1978
- [10] G. S. N. RAJU, AJAY CHAKRABORTY, and B. N. DAS, "Studies on Wide Slots in the Narrow Wall of Rectangular Waveguide," IEEE Trans., Antennas propagat., vol. 38, NO. 1 pp. 24-29, January 1990.



김민준(Min-Joon Kim)
1976년 2월 아주대학교 전자
공학과 졸업(공학사)
1980년 2월 고려대학교 대학원
전자공학과 졸업(공학석사)
1987년 2월 고려대학교 대학원
전자공학과(공학박사)

1986년 3월~현재 동의대학교 전자통신공학과 교수
* 관심분야 : 마이크로파 소자 및 회로 설계, 안테나 해석 등



박정호(Jeong-Ho Park)
1998년 2월 동의대학교 전자
통신공학과 졸업(공학사)
1998년 3월~현재 : 동의대학교
대학원 전자공학과 재학중
* 관심분야 : 마이크로파 소자
및 회로 설계, 안테나 해석 등