

모멘트법을 이용한 도파관 복사소자의 설계에 관한 연구

민경식*, 박세현*, 김동철*, 임학규*

*한국해양대학교 전파공학과

A study on Design for Radiation Element of Slotted Waveguide by the Method of Moment

Kyeong-Sik Min*, Se-Hyun Park*, Dong-Chul Kim and Hag-Gyu Lim

*Dept. of Radio Science & Engineering, Korea Maritime University

#1, Dongsam-Dong, Youngdo-Ku, Pusan Maritime University

Tel) 051-410-4425 / E-mail : ksmin@hanara.kmaritime.ac.kr

ABSTRACT

This paper presents design for radiation element of slotted waveguide by the method of moment. The piecewise sinusoidal function as the basis function is used for the Moment Method. From the analytically results based on the Galerkin's moment method, frequency characteristics and radiation power is investigated for the design parameter such as the slot length, offset and angle. This paper also discusses that the radiation power is controlled by the slot offset and angle. The thickness of the waveguide wall is also discusses in the analysis.

I. 서론

도파관을 이용한 평면 안테나는 효율이 높고, 소형화, 경량화가 가능하고, 구조상 튼튼하며, 다른 평면 안테나에 비해 전송손실이 적은 장점을 가지고 있다.[1][2] 일반적으로 마이크로스트립 안테나나 트리플레이트를 이용한 평면 안테나들은 주파수가 높아지면 높아질수록 동손에 의한 효율이 저하되는 단점이 있으나 도파관의 경우에는 이를 무시할 수 있을 정도로 매우 적다. 위성방송(DBS)을 비롯한 고주파수대에서는 다른 급전선로(microstrip line, traplate line, suspended line)에 비해 급전손실이 매우 적고 복사소자의 구조가 간단한 도파관을 이용한 슬롯 어레이 안테나가 많이 사용되고 있다.[3][4] 따라서 본 논문에서는 도파관 슬롯 어레이 안테나[5]를 해석·설계하기 위하여 먼저 Fig. 1.과 같이 도파관 광벽면에 선형슬롯 한 개를 가지는 도파관에 대하여 해석하였다.

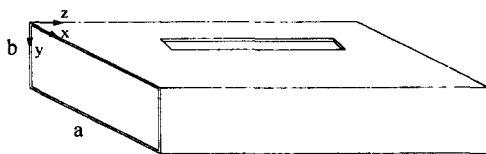


Fig. 1. Slotted Waveguide with One Slot.

도파관에 대한 해석은 Galerkin's 모멘트법을 이용하여 전자계해석을 행하였다.[6] 해석에 있어서는 도파관 벽의 두께를 고려하여 해석하였다.

II. 도파관 슬롯 해석

Fig. 1.에서 나타낸 도파관 광벽면의 선형슬롯은 모멘트법으로 해석하기 위해 Fig. 2.와 같이 등가적인 해석모델로 나타낼 수 있다. 해석을 위해 도파관의 영역은 크게 도파관 내부영역 G_I , Rectangular Cavity 영역 G_{II} , 반 자유(half-space)영역 G_{III} 로 나누어 해석한다.

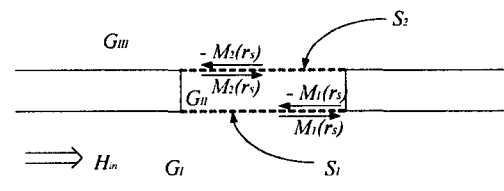


Fig. 2. Equivalent Analysis Model

G_I 과 G_{II} 의 경계면을 S_I 이라 하고, S_I 표면 위의 미지의 접선 전계를 미지의 등가 자유

\mathbf{M}_1 과 $-\mathbf{M}_1$ 으로 표현할 수 있다. 등가자류의 방향이 S_7 을 경계로 부호가 바뀌는 것은 S_7 표면에 대해 \mathbf{G}_I 영역에서의 법선벡터와 \mathbf{G}_{II} 에서의 법선벡터의 방향이 반대가 되기 때문에 등가자류의 방향도 반대로 된다. 슬롯의 표면 S_1 과 S_2 에 경계조건과 dyadic green 함수를 이용하여 미지의 자류 $\mathbf{M}_s(s=1,2)$ 에 대해 다음과 같은 적분 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{On } S_1 \\ H_{in} + \int_{S_1} \mathbf{G}_I(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_s) \cdot \mathbf{M}_1(\mathbf{r}_s) dS_s \\ = \int_{S_1} \mathbf{G}_{II}(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_s) \cdot (-\mathbf{M}_1(\mathbf{r}_s)) dS_s \\ + \int_{S_2} \mathbf{G}_{II}(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_s) \cdot (\mathbf{M}_2(\mathbf{r}_s)) dS_s \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{On } S_2 \\ \int_{S_1} \mathbf{G}_{II}(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_s) \cdot (-\mathbf{M}_1(\mathbf{r}_s)) dS_s \\ + \int_{S_2} \mathbf{G}_{II}(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_s) \cdot (\mathbf{M}_2(\mathbf{r}_s)) dS_s \\ = \int_{S_2} \mathbf{G}_{III}(\mathbf{r}_0|\mathbf{r}_s) \cdot (-\mathbf{M}_2(\mathbf{r}_s)) dS_s \end{aligned} \quad (2)$$

H_{in} 은 도파관 내부로 입사되는 입사파이고, \mathbf{G}_I , \mathbf{G}_{II} 와 \mathbf{G}_{III} 는 dyadic green function이며, \mathbf{r}_0 와 \mathbf{r}_s 는 관측점과 소스점을 나타낸다. 자류 \mathbf{M} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M} = \sum (\hat{x} f_x(x_i) f_x(z_i) + \hat{z} f_z(x_i) f_z(z_i)) \quad (4)$$

위 식은 간략히 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$\mathbf{M}_i = \sum_i A_i \mathbf{m}_i \quad (5)$$

식(5)에서 A_i 는 미지의 자류진폭을 나타내는 계수이고 \mathbf{m}_i 는 자류 \mathbf{M} 의 기본함수이며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{m}_i = \hat{x} f_i(x_i) g_i(z_i) \quad (6)$$

본 논문에서는 기본함수로 Piecewise Sinusoidal Function을 적용하였으며 슬롯상의 $f_i(x_i)$ $g_i(z_i)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$f_i(x_i) = \frac{\sin k_0(l_i - |x_i|)}{\sin k_0 l_i} \quad (7)$$

Static Filed에서 맥스웰의 분포를 이용하여

$$g_i(z_i) = \frac{1}{\sqrt{(\frac{w_i}{2})^2 - (\frac{z_i}{2})^2}} \quad (8)$$

식(7)과(8)에서 k_0 는 자유공간에서의 파수이고, l_i 와 w_i 는 각각 슬롯의 길이와 폭을 나타낸다. Test Function(or Weighting Function)을 식(1)과 식(2)에 곱하면 두 개의 연립적분방정식이 얻어지는데 이로부터 미지의 계수 A_1 과 A_2 를 구할 수 있다.

Fig. 3.은 도파관 광벽면에 있는 슬롯의 좌표를 나타내고 있으며 x_i 와 z_i 는 국부 좌표계를 나타낸다. 국부 좌표계에서의 한점 (p_i, q_i) 는 식(9)에 의해 원래의 좌표계(x,z)로 변환할 수 있다.

$$x = p_i + x_i \cos \theta_i, \quad z = q_i + z_i \sin \theta_i \quad (9)$$

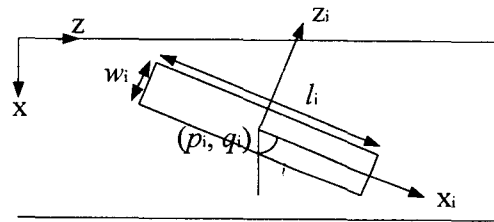


Fig. 3. Local Coordination of Slotted Waveguide

Fig. 4.는 반사계수 및 투과계수를 구하기 위한 개념도를 나타내고 있다. 도파관의 슬롯을 통하여 공간으로 복사되는 복사전력은 입력신호에서 반사신호와 투과신호를 빼는 것에 의해 구할 수 있으며 다음 식에 의해 간단히 구할 수 있다.

$$R_p = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 \quad (10)$$

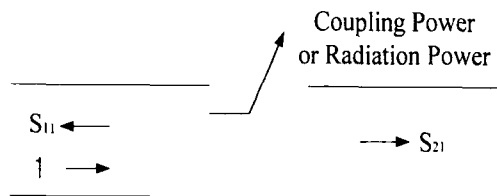


Fig. 4. Calculation of Radiation Power

III. 도파관 슬롯 설계

Fig. 5.는 본 논문에서 해석하기 위한 광범면에 슬롯을 가지는 도파관의 구조를 나타내고 있다. 설계 파라미터로는 슬롯 길이(S_l), 슬롯 폭(S_w), 슬롯 각도(S_θ)와 슬롯 Offset(S_o)가 있다.

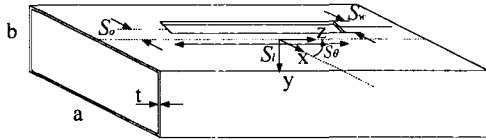


Fig. 5. Structure of Analysis Model

Table 2.는 Fig.5에서 나타낸 도파관에 대한 설계파라미터를 나타내고 있다. 설계에는 표준 구형도파관 WR-229를 고려하여 설계주파수는 3.95 GHz로 하였다.

Table 2. Design Parameters

Design Frequency	3.95 [GHz] ($\lambda_g=100.3\text{mm}$)
Waveguide Width (a)	58.1 mm
Waveguide Thickness (b)	29.1 mm
Relative Electric Constant	1
Wall Thickness (t)	1.6 mm
Slot Width (S_w)	5 mm

Fig. 6.은 슬롯의 Offset 11.25 mm (도파관의 가장자리), 슬롯의 폭은 5 mm, 슬롯과 도파관의 각도 90° 일 때 슬롯 길이변화에 대한 주파수 특성을 나타내고 있다.

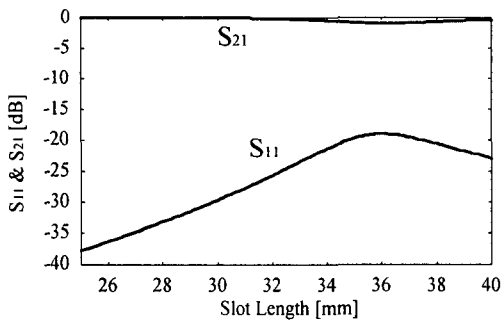


Fig. 6. Frequency Characteristics for the Variation Slot Length

Fig. 7.은 이때의 복사전력을 나타내고 있는데 그룹을 통해 슬롯의 길이가 약 36.0($0.36 \lambda_g$)일 때 복사전력이 최대가 됨을 알 수 있다. 따라서 슬롯의 길이를 복사전력이 최대가 되는 36.0 mm로 고정하여 슬롯의 Offset에 대한 해석을 행하였다

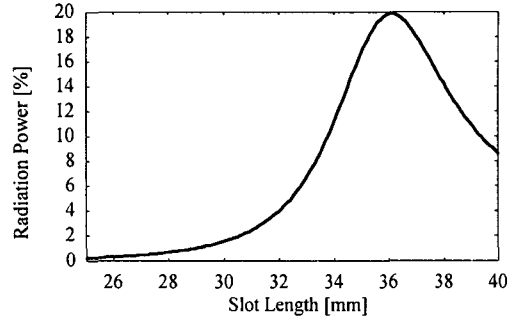


Fig. 7. Radiation Power for the Variation Slot Length

Fig. 8.은 슬롯의 폭 5 mm, 슬롯과 도파관의 각도 90° , 슬롯의 길이를 앞서 구한 36 mm로 고정하고 슬롯 Offset변화에 대한 주파수특성을 나타내고 있다.

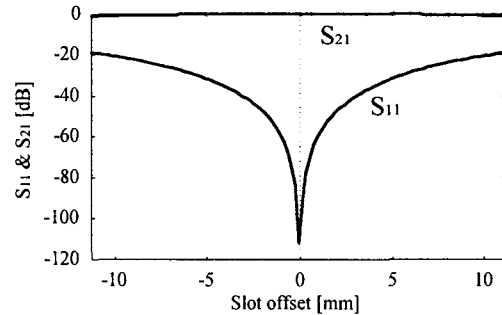


Fig. 8. Frequency Characteristics for the Variation Slot Offset

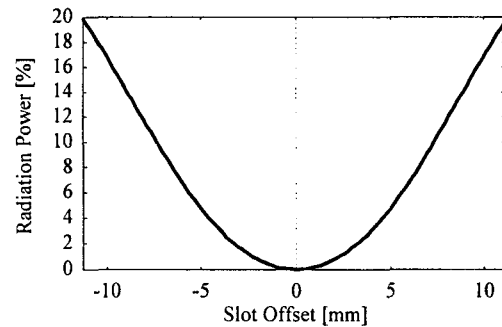


Fig. 9. Radiation Power for the Variation Slot Offset

Fig. 9.는 이때의 복사전력을 나타내고 있는데 도파관의 중심을 기준으로 Offset에 대한 복사전력은 양방향으로 대칭이 되는 것을 알 수 있다. 그림을 통해 슬롯의 Offset이 0일 때 즉, 슬롯이 도파관의 정 중앙에 위치해 있을 경우 슬롯을 통해 공간으로 복사되는 전력은 거의 0이 되고, 도파관의 가장자리에 슬롯이 위치할 경우 복사전력이 최대가 됨을 알 수 있다.

Fig. 10.은 슬롯의 폭 5 mm, 슬롯의 길이 36 mm, 슬롯 Offset 0 mm일 때 슬롯과 도파관이 이루는 각도에 대한 주파수특성을 나타내고 있다. Fig. 10. 과 Fig. 11.을 통해 우리는 슬롯이 도파관의 중심에 있을 때 슬롯과 도파관이 이루는 각도 변화에 의해 복사전력의 양에 상당히 많은 변화가 생김을 알 수 있다. 도파관의 중심에서 슬롯이 도파관의 길이 방향과 슬롯이 직각($s_\theta = 0^\circ$)이 될 때 슬롯을 통해 공간으로 복사되는 복사전력이 최대가 되고, 도파관이 길이방향과 평행하게 슬롯이 놓여질때($s_\theta = 90^\circ$) 최소가 됨을 알 수 있다.

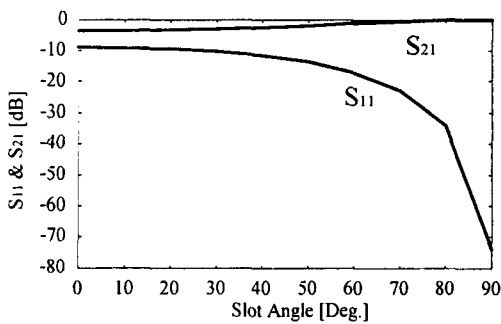


Fig. 10. Frequency Characteristics for the Variation Slot Angle

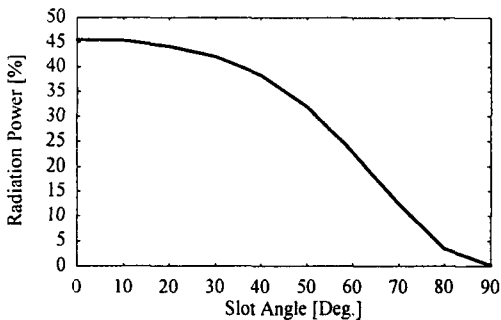


Fig. 11. Radiation Power for the Variation Slot Angle

IV. 결론

본 논문에서는 도파관 광벽면에 위치한 복사

소자에 관한 해석 및 설계를 행하였다. Galerkin 모멘트법에 이용하여 슬롯의 길이, Offset, 도파관과 슬롯사이의 각도에 대한 최적설계를 행하였다. 슬롯의 Offset에 대한 시뮬레이션 결과 슬롯의 위치는 도파관의 가장자리에 위치할 경우 슬롯을 통해 공간으로 복사되는 전력이 최대가 됨을 알 수 있었다. 슬롯과 도파관이 이루는 각도는 도파관의 중심에서 도파관의 길이방향과 슬롯이 90° 가 될 때 복사 전력이 최대가 됨을 알 수 있었다. 이러한 계산결과들은 어레이시에 중요한 설계 파라미터로 작용될 수 있을 것이다. 향후 실제 제작하여 실험결과와 모멘트법을 이용한 계산결과를 비교하여 본 논문에서 제시한 설계법의 타당성을 입증하는 것이 과제로 남아 있다.

참고문헌

- [1] 민경식, 김광욱, 김동철, 임학규 "동상 급전용 π 분기를 이용한 일층구조 급전도파관의 설계" 1999년 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, vol.22, no.1, pp. 146-150, 고려대, 1999. 5.
- [2] 민경식, 김광욱, 김동철, 임학규 "일층구조 도파관 어레이 안테나용 동상 급전 회로의 종단부 해석과 설계에 관한 연구" 1999년 춘계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, vol.22, no.1, pp. 151-155, 고려대, 1999. 5.
- [3] Jiro. Hirikawa., "A Study of Slotted Waveguide Array Antenna", Department of Electrical and Electronic Engineering Tokyo Institute of Technology, Doctoral Dissertation, Nov., 1993.
- [4] Kyeong-Sik Min., "A Study of Single Layer Polarization Converters for Slotted Waveguide array antennas", Department of Electrical and Electronic Engineering Tokyo Institute of Technology, Doctoral Dissertation, June, 1996.
- [5] Kunio Sakakibara., "Study of Single Layer Slotted Waveguide Arrays", Department of Electrical and Electronic Engineering Tokyo Institute of Technology, Doctoral Dissertation, Feb., 1996.
- [6] Roger F. Harrington., "Field Computation by Moment Method", 1968.