

도체 스크린의 좁은 슬릿을 통한 전자파 최대 투과 현상

Maximum Electromagnetic Transmission through a Narrow Slit in Conducting Screen

이 종 익 · 조 영 기*

Jong-Ig Lee · Young-Ki Cho*

요 약

본 연구에서는 무한 도체판의 좁은 슬릿에 TM 편파된 평면파가 입사되는 경우의 전자기적 결합 문제를 고려하였다. 등가 회로를 이용하여 공진된 슬릿을 통한 최대 전력 투과 메커니즘을 설명하는데 연구의 주안점을 두었다. 슬릿이 공진되었을 때 좁은 슬릿을 통해 투과된 전력은 슬릿 폭에 무관하게 유효 슬릿 폭 $1/\pi$ 파장에 도달되는 전력과 동일함을 보였다. 제안된 구조와 두꺼운 도체 스크린에서의 좁은 슬릿을 통한 최대 전력 투과 현상들의 유사성을 등가 회로의 관점에서 기술하였다. 또한, 공진이 일어났을 때 슬릿에 의한 산란 전력과 슬릿을 통한 투과 전력이 동일함을 확인하였다.

Abstract

In this study, the electromagnetic coupling problem through narrow slit in an infinite conducting screen is considered for the case that the TM polarized plane wave is incident upon the slit. This study aims at explaining the mechanism of the maximum power transmission via the resonated slit using the equivalent circuit. It is shown that the transmitted power through the slit for the case of resonance corresponds to the power normally incident upon the conducting plane of the effective width $1/\pi$ wavelengths, irrespective of the slit width. Some similarities between the maximum power transmissions observed in both the proposed structure and narrow slit in thick conducting screen are described from the viewpoint of equivalent circuit. In addition, it is found that, when the slit is resonated, the transmitted power equal to the scattered power.

Key words : Coupling, Narrow Slit, Resonance, Maximum Transmission

I. 서 론

좁은 개구를 통한 전자파 투과 및 공진 문제^{[1]~[4]}는 오랫동안 많이 다루어진 전자기 문제 중 하나이다. Harrington^[3]은 두꺼운 도체 스크린의 좁은 슬릿을 통한 전자기적인 투과 문제를 등가 회로화 하고 도체 스크린의 두께가 반 파장의 정수배에 근접한 경우에 공진 현상이 관찰될 수 있음을 보였다. 이

때, 좁은 슬릿을 통해 투과 가능한 전력의 최대치는 슬릿의 폭에 무관하게 일정하며, 이 최대치는 $1/\pi$ 파장에 도달되는 전력에 해당되므로 슬릿의 유효폭은 $1/\pi$ 파장이 됨을 보였다. 또한, 문제의 구조를 3차원으로 확대하여 후방에 근접 도체를 갖는 작은 개구의 공진 현상을 연구^[4]하였으며, 좁은 개구를 통한 투과 전력의 최대치는 개구 사이즈에 무관하게 일정하고 공진이 된 작은 개구의 유효 투과 단면적

「본 연구는 Brain Korea 21 사업 지원으로 수행되었다.」

동서대학교 전자공학과(Department of Electronics Eng., Dongseo University)

*경북대학교 전자전기컴퓨터학부(School of Electrical Eng. and Computer Science, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 20080523-05S

· 수정완료일자 : 2008년 7월 25일

은 $3\lambda^2/(4\pi)$ 이 됨을 확인하였다.

본 연구에서는 TM 편파된 평면파가 후방에 근접 산란체를 갖는 무한 도체판의 좁은 슬릿에 입사된 경우의 전자기적인 결합 문제를 고려하였다. 슬릿의 폭이 좁은 경우에 대한 등가 회로를 얻고 이로부터 슬릿이 공진되었을 때 좁은 슬릿을 통한 투과 전력 및 유효 슬릿 폭의 최대치를 구하고, 이 때 관찰되는 슬릿의 공진 현상과 두꺼운 도체 스크린의 좁은 슬릿을 통한 전자파 투과 문제에서의 공진 현상과의 본질적인 상호 유사성에 관하여 등가 회로 관점에서 논의하고자 한다. 또한, 근접 도체 스트립에 의해 공진된 경우의 유효 슬릿 폭의 변화를 관찰하여, 슬릿이 공진되었을 때 실제 슬릿 폭에 무관하게 유효 슬릿 폭은 $1/\pi$ 파장으로 일정함을 확인해 보고자 한다.

II. 본 론

그림 1은 본 연구에서 제안된 구조의 단면도이며, y방향으로 변화가 없는 2차원 구조이다. 영역 1($z < 0$)로부터 무한 도체판상의 슬릿 영역($z=0$)으로 TM 편파($E_y=0$)된 평면파가 θ_0 의 각도로 입사되며, 슬릿 근처 영역 2에는 산란체가 놓여 있다. 편의상 각 영역의 전기적 특성은 자유 공간(μ_0, ϵ_0)과 동일하다고 가정하였다. 폭이 좁은 슬릿을 통한 결합 문제에 대한 등가 회로로부터 영역 2로의 투과(결합) 전력 및 유효 슬릿 폭의 최대치를 구하고 그 원리를 살펴 보고자 한다.

먼저 근접 산란체가 없이 좁은 슬릿만 존재하는 경우, 슬릿을 가로 질러 영역 1과 영역 2의 전자계 접선 성분(H_{y1}, H_{y2})의 연속 조건($H_{y1} = H_{y2}$)에 의한 슬릿의 등가 자류(equivalent magnetic current)에 대한 적분 방정식(integral equation)은 다음과 같다.

$$H_{y1}^{sc} + H_{y1}^M = H_{y2}^M \quad (1)$$

$$H_{y1}^{sc} = 2H_0 e^{-jk_0 x \sin \theta_0} \quad (2)$$

$$H_{y1}^M = - \int_{\text{slit region}} E_x^a(x') \frac{k_0}{2\eta_0} H_0^{(2)}(k_0|x-x'|) dx' \quad (3)$$

$$H_{y2}^M = -H_{y1}^M \quad (4)$$

여기에서, $H_0 = |H^i(x, z)|$ 는 입사 자계의 세기, $E_x^a(x)$ 는 슬릿 영역의 E_x 성분, k_0, η_0 는 자유 공간

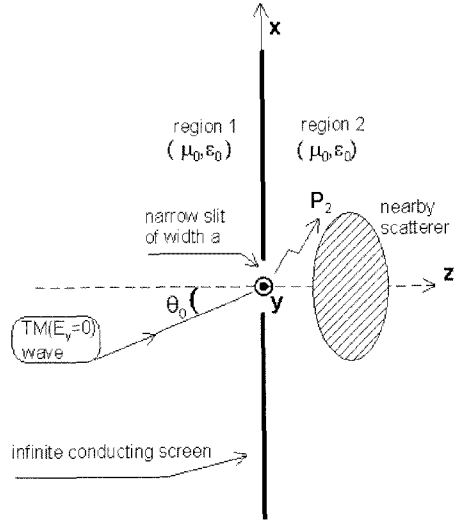


그림 1. 제안된 구조

Fig. 1. Geometry under consideration.

의 전파 상수와 파동 임피던스를 각각 의미하며, $H_n^{(2)}$ 는 n 차 2종 한켈(Hankel) 함수를 나타낸다. 식 (1)에서 H_{y1}^{sc} 는 슬릿이 단락된 경우의 단락 회로 자체이고, H_{y1}^M 및 H_{y2}^M 은 슬릿의 등가 자류 $M [= \hat{y}E_x(x, 0) = \hat{y}E_x^a(x)]$ 에 의한 산란 자체이다.

폭이 좁은 슬릿($k_0 a \ll 1$)의 전자계 분포를 $E_x^a(x) \approx E_a = V_a/a$ 및 $H_y^{sc} \approx 2H_0$ 로 근사적으로 균일(uniform)하다고 가정하면 적분 방정식은

$$(Y_1 + Y_2) V_a = I_s = 2 H_0 \quad (5)$$

로 단순화되며, 여기에서

$$\begin{aligned} Y_1 &= Y_2 = Y_0 = G_0 + jB_0 \\ &= \frac{k_0}{2\eta_0} \left[1 - j \frac{2}{\pi} \left(\log \frac{k_0 a \gamma}{2} - 1.5 \right) \right] \\ &= \frac{1}{120\lambda_0} \left[1 - j \frac{2}{\pi} \left(\log \frac{k_0 a \gamma}{2} - 1.5 \right) \right], \gamma = 1.781 \end{aligned} \quad (6)$$

이다.

그림 2(a)는 식 (5)에 대한 간단한 등가 회로이다. 식 (6)에서 근접 산란체가 없이 슬릿의 폭이 좁은 경우 $G_0 \ll B_0$ 이므로 슬릿을 통해 결합(투과)된 전력은 매우 작은 값이 되나, 슬릿 근처 영역 2에 산란체를 적절히 위치하면 어드미턴스 Y_2 및 슬릿의 전압 V_a 는 새로운 값 Y_2' 및 V_a' 으로 변화된다. 영

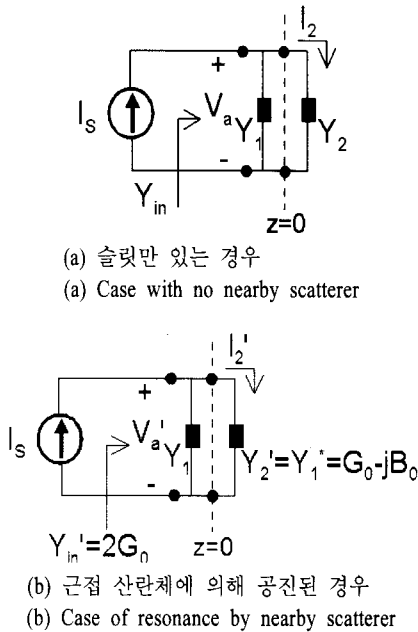


그림 2. 등가 회로
Fig. 2. Equivalent circuit.

역 2의 근접 산란체에 의한 슬릿의 공진은 그림 2(b)와 같이 $Y_2' = Y_1' = G_0 - jB_0$ 이 되어 $Y_{in}' = 2G_0 = 1/60 \lambda_0$ 일 때 일어난다. 이 때, 슬릿의 전압은

$$V_a' = I_s / Y_{in}' = 2H_0 60 \lambda_0 = 120H_0 \lambda_0 \quad (7)$$

이고, 슬릿을 통해 영역 2로 결합된 전력은 $P_2 = 0.5 \text{Re}\{V_a'(I_2')^*\} = 60 \lambda_0 H_0^2$ 이 된다.

y방향으로 단위 길이당 투과 전력 $P_2[\text{W}]$ 를 입사 포인팅 전력 $P_0(=0.5\eta_0 H_0^2)[\text{W/m}]$ 로 정규화한 것으로 유효 슬릿 폭(effective slit width) a_{eff} 을 정의하면 공진시 유효 슬릿 폭은 최대가 되고 이는

$$\max \text{ of } a_{eff} = P_{2\max} / P_0 = \lambda_0 / \pi \quad (8)$$

와 같이 구할 수 있으며, 이것은 두꺼운 도체 스크린의 좁은 슬릿의 공진시 유효 슬릿 폭^[3]과 일치하는 것이다. 공진시 유효 슬릿 폭이 λ_0/π 라는 것은 실제 슬릿 폭(a)은 파장에 비해 매우 작지만 슬릿이 근접 산란체 등에 의해 공진되면 입사 평면파의 전력 중 폭 λ_0/π 에 해당되는 영역에 도달되는 전력이 좁은 슬릿을 통해 영역 2로 투과되는 것을 의미하며, 이것은 등가 회로 그림 2(b)에 있어서는 Y_2' 에 전달(혹은 Y_2' 에 의해 소모)되는 전력이다.

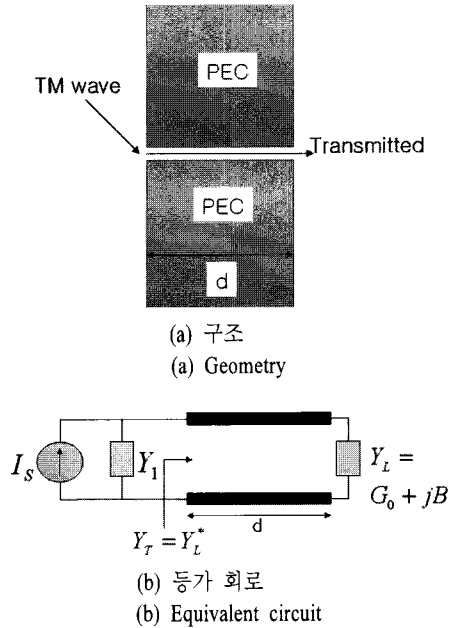


그림 3. 두꺼운 도체 스크린의 슬릿을 통한 전자파 투과

Fig. 3. Transmission of EM wave through narrow slit in a thick conducting screen.

등가 회로 그림 2(b)에 있어서 근접 산란체에 의해 $Y_2' = Y_1'$ 가 되듯이, 그림 3에 도시된 두꺼운 도체 스크린의 좁은 슬릿을 통한 전자파 투과 문제^[3]에 있어서 슬릿의 공진(혹은 전자파 최대 투과)은 슬릿 폭(d)을 변화시켜 등가 회로(그림 3(b))의 Y_T 를 $Y_T = Y_L^* = G_0 - jB$ 가 되도록 함으로써 공진을 얻을 수 있다. 따라서 본질적으로 제안된 구조의 좁은 슬릿과 두꺼운 도체 스크린의 좁은 슬릿에서의 공진 현상은 최대 전력 전달 관점에서 동일하다고 볼 수 있다. 슬릿 어드미턴스(Y_L)의 콘덕턴스는 G_0 로 제안된 구조에 대한 등가 회로인 그림 2(a)에서와 동일하고 서셉턴스 B 는 슬릿의 폭이 매우 좁은 경우 B_0 에 근접($B \approx B_0$)해 간다^[5].

그림 2(b)에 의하면 부하 Y_2' 에 의해 소모되는 전력(P_2)과 Y_1 에 의해 소모되는 전력(P_1)은 동일하다. 그러면 Y_1 에 의해 소모되는 전력(P_1)은 무엇을 의미하는 것일까? 이것은 슬릿에 의해 영역 1에서 산란된 전력(scattered power) P_s 으로 볼 수 있으며, 산란 전력은 슬릿의 등가 자유에 의한 영역 1에서의 복사 전력을 계산함으로써

$$P_s = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 0.5\eta_0 |H_{y1}^M(\rho, \theta)|^2 \rho d\theta$$

$$= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{k_0}{4\pi\eta_0} |\widetilde{E}_x^a(\theta)|^2 d\theta \approx H_0^2/2G_0 = P_1 = P_2 \quad (9)$$

$$\widetilde{E}_x^a(\theta) = \int_{\text{slit}} E_x^a(x) e^{jk_0 x \sin \theta} dx$$

$$\approx V_a \text{Sa}(k_0 \sin \theta \cdot a/2) \approx V_a = H_0/G_0 \quad (10)$$

와 같이 구할 수 있는데, 이로부터 영역 1에서 좁은 슬릿에 의해 산란된 전력(P_s)은 등가 어드미턴스 Y_1 에 의해 소모된 전력임을 확인할 수 있다.

영역 1에서 -z 방향으로 전파되는 전자파는 슬릿에 의한 산란파와 도체 스크린에 유기된 전류 $\widehat{y} \times \widehat{y} H_{y1}^{sc}|_{z=0} = \widehat{x} 2H_0 \exp(-jk_0 x \sin \theta_0)$ 에 의한 반사 평면파이다. 슬릿에 수직 입사($\theta_0=0$)된 경우를 가정하고 공진된 슬릿의 유효 슬릿 폭 λ_0/π 영역에 걸친 유기 전류($J = \widehat{x} 2H_0$ over $-\lambda_0/2\pi < x < \lambda_0/2\pi$)에 의한 반사파의 방향($\theta=0$)으로 전자계를 계산해 보면 슬릿의 등가 자유에 의한 산란 전자계 [$H_{y1}^M(\rho, \theta)$]와 상호 역위상이 되어 상쇄됨을 확인할 수 있다. 이것은 유효 슬릿 폭에 해당되는 영역의 유기 전류에 의해 반사되는 평면파와 슬릿의 등가 자유에 의한 산란 전자계는 입사 평면파의 반사 방향에 있어서 상쇄되는 것을 의미한다. 그리고 상쇄된 전력량만큼 영역 2로 투과되므로 전력 보존 법칙은 성립된다.

위의 결과들로부터 좁은 슬릿이 공진되었을 때 최대 전력 투과 현상은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 영역 2로의 최대 투과 전력(P_2)은 슬릿 폭에 무관하게 유효 슬릿 폭 λ_0/π [m] 영역에 도달되는 전력과 동일하다. 둘째, 공진시 영역 2로의 투과 전력(P_2)은 영역 1에서의 산란 전력(P_s)과 동일하다. 셋째, 공진시 영역 1에서의 산란 전자계는 도체 스크린에 의한 반사파 중 유효 슬릿 폭에 해당되는 반사파를 상쇄시키는 것으로 볼 수 있다. 이러한 개념들은 두꺼운 도체 스크린의 좁은 슬릿을 통한 전자파 최대 투과 현상^[3]의 이해에도 확장할 수 있을 뿐만 아니라, 3차원 문제인 슬릿의 공진 메커니즘 이해^[4]에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

다음으로 근접 산란체에 의해 실제로 슬릿이 공진되었을 때 슬릿 폭(a)에 무관하게 유효 슬릿 폭(a_{eff})이 λ_0/π 로 일정하게 유지되는가 살펴보고자 한다. 그림 4는 슬릿에 근접한 산란체가 도체 스트립

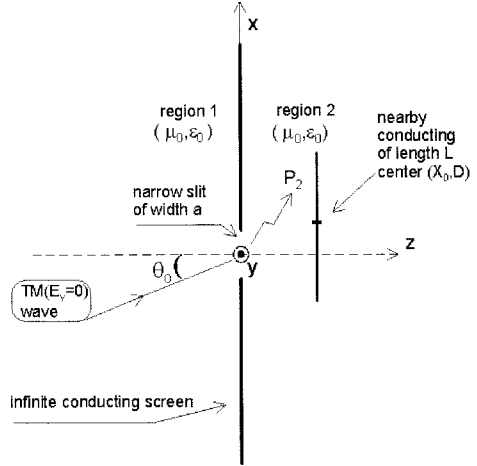


그림 4. 근접 산란체가 도체 스트립인 경우
Fig. 4. Case of nearby conducting strip.

인 구조를 도식한 것이며, 스트립의 길이(L)와 위치(X_0, D)를 변화시켜 슬릿의 공진(혹은 슬릿을 통한 최대 전력 투과)을 얻을 수 있다. 그림 4의 전자기 문제를 해석하기 위해 슬릿의 전계와 스트립의 유기 전류에 관한 결합적 미분 방정식(coupled integro-differential equations)을 모멘트 방법(moment method)을 이용하여 수치적으로 풀었다^[6]. 참고로 슬릿의 전계는 펄스 함수, 스트립의 전류는 구분 정현 함수로 각각 전개하고 Galerkin 방법으로 테스트링 하였다.

그림 5는 슬릿의 폭이 $a=0.001 \lambda_0 \sim 0.05 \lambda_0$ 인

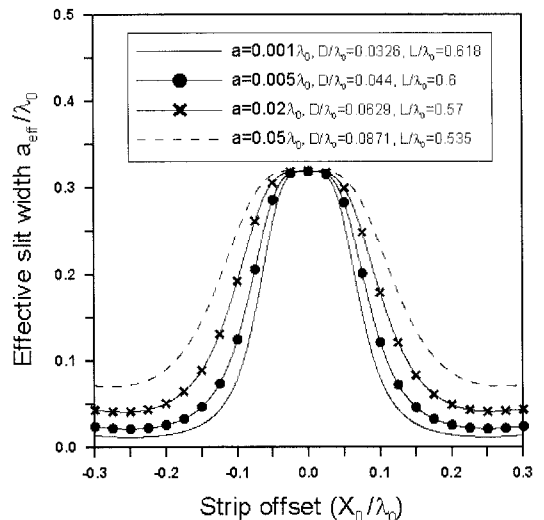


그림 5. 유효 슬릿 폭(a_{eff})의 변화
Fig. 5. Variation of effective slit width a_{eff} .

경우, 스트립의 변위(X_0)에 따른 유효 슬릿 폭의 변화를 계산한 것이다. 슬릿 폭(a)이 감소됨에 따라 슬릿과 스트립 간의 거리(D)가 감소되고, 스트립의 길이(L)은 증가될 때 공진이 관찰됨을 알 수 있다. 또한 $X_0=0$ 근처에서는 유효 슬릿 폭은 최대가 되며, 그 값은 앞서 이론적으로 예측된 바와 같이 $\lambda_0/\pi=0.3183 \lambda_0$ 로서 실제 슬릿 폭(a)에 무관하게 일정함을 확인할 수 있다.

III. 결 론

무한 도체판의 좁은 슬릿에 TM 편파된 평면파가 입사되는 경우, 슬릿의 공진 현상(혹은 최대 결합 현상)에 대한 메커니즘을 분석하였다. 슬릿의 폭이 좁은 경우에 대한 등가 회로를 이용하여 공진된 슬릿을 통한 최대 결합 전력과 유효 슬릿 폭(λ_0/π)이 슬릿의 폭에 무관하게 일정함을 확인하였다. 공진시 슬릿을 통해 투과된 전력과 슬릿에 의해 산란된 전력이 동일함 확인하였으며, 슬릿에 의한 산란 전자계와 유효 슬릿 폭에 해당되는 유기 전류에 의한 반사 전자계가 상쇄됨을 확인하였다. 본 연구에서 관찰된 결과들은 슬릿의 공진 메커니즘에 관한 이해뿐만 아니라 3차원 슬롯 구조의 공진 현상 이해에도 유용할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] H. A. Bethe, "Theory of diffraction by small hole", *Phys. Revs.*, vol. 66, pp. 163-182, Oct. 1944.
- [2] C. M. Butler *et al.*, "Electromagnetic penetration through apertures in conducting surfaces", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 26, pp. 82-93, Jan. 1978.
- [3] R. F. Harrington, D. T. Auckland, "Electromagnetic transmission through narrow slots in thick conducting screens", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 28, pp. 616-622, Sep. 1980.
- [4] R. F. Harrington, "Resonant behavior of a small aperture backed by a conducting body", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, pp. 205-212, Mar. 1982.
- [5] 이종익, 김강욱, 조영기, "플랜지된 평행평판도파관으로 급전된 슬릿의 등가 어드미턴스 및 좁은 슬릿을 통한 최대결합 메커니즘", *한국전자과학 회논문지*, 15(11), pp. 1116-1122, 2004년 11월.
- [6] 이종익, 조영기, "후방에 근접 도체 스트립을 갖는 도체 스크린의 좁은 슬릿을 통한 전자파 투과", 2004년 추계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 27(2), pp. 492-495, 2004년 9월.

이 종 익



1992년: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
 1998년: 금오공과대학교 연구교수

1999년~현재: 동서대학교 전자공학과 부교수
 [주 관심분야] 전자기산란, 평면안테나

조 영 기



1978년: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1998년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 1981년~현재: 경북대학교 전자전

기컴퓨터학부 교수
 1992년~현재: 국제전파연합(URSI) 한국대표
 2004년~2007년: 한국전자과학회 부회장
 2002년~현재: 경북대학교 공과대학 BK사업 단장
 2008년~현재: 한국전자과학회 회장
 [주 관심분야] 전자기 산란 및 복사, 주기구조, 안테나 이론