

論文 92-29A-11-7

## 손실이 있는 원통형 다층 유전체의 차폐특성 해석

## (Analysis of Shielding Characteristics on the Cylindrical Lossy Multilayered Dielectric)

柳 晁\*, 李 相 高\*

(Hwang Ryu and Sang Seul Lee)

## 要 約

본 논문에서는, 시린더구조를 갖는 다층 유전체의 차폐특성을 해석한다. 차폐특성을 측정하기 위하여 유전층 내부에 도체를 두고, 평면파가 입사하였을 때 내부도체에 유기되는 전류밀도를 계산하였다. 계산결과는 유전율 분포가 전자파 차폐특성에 매우 크게 영향을 주고 있음을 보여주고 있다.

## Abstract

In this paper, the shielding characteristics of a cylindrical multilayered dielectric are analyzed. In order to evaluate shielding effects, we consider the case that plane waves are incident upon an infinitely long cylindrical multilayered dielectric which surrounds a conductor core. For perfect and lossy dielectric distributions, total induced currents at the conductor surface are computed. It was found from those results that electromagnetic characteristics of the multilayered dielectric are largely dependent on dielectric distribution.

## I. 서 론

최근 전자파의 사용범위가 확대 되면서 EMC 기술의 필요성이 점차 증대 되고 있다. 원하지 않는 원천(source)으로부터 발생된 전자파는 인접 전자기기에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 최신 전자기기는 매우 민감하고 정밀하므로 전자파의 차폐는 매우 중요한 문제이다. 한편, 경우에 따라서는 전자파를 많이 투과시키는 일 또한 중요하다. 레이돔은 자연현상으로부터 안테나의 훼손

을 막을뿐 아니라, 불요전자파를 차폐하면서 원하는 주파수의 전자파를 강하게 받아들임으로써 통신효율을 극대화 하도록 설계되어야 한다.

이러한 요구를 만족시키기 위한 방법중 하나로 유전체를 다층으로 배열하는 방법이 사용되어왔다. 다층유전체에 관한 연구는 Kong, Miyazaki 등에 의해 연구되었으나, 이는 평면에 관한 것이었다.<sup>[1][2]</sup>

본 논문에서는 무한히 긴 도체 시린더를 유전체가 여러 층으로 감싸고 있을 때 외부평면파에 의하여 도체주위에 유기되는 총전류를 계산함으로써 다층유전체 시린더의 차폐특성을 해석한다.

각 유전체 경계에서의 특성행렬을 구하고, 이를 이용하여 유전체 반경을  $0.1\lambda - 1\lambda$ 까지 변화시켰을 때 여러가지 유전율 분포에 따른 전류밀도를 계산하였다. 이때, 각

\*正會員, 漢陽大學校 電子通信工學科  
(Dept. of Elec. Commun. Eng., Hanyang Univ.)  
接受日字: 1992年 7月 27日

유전체를 완전유전체와 손실이 있는 유전체로 가정함으로써 유전율의 크기에 대한 전자파 차폐특성을 알 수 있도록 하였다.

II. 이론적 해석

그림 1은 z방향으로 무한히 긴 원통형 다층 유전체의 구조를 나타낸 것이다. 여기서 m=1, ... M은 유전체를 나타내고 m=0은 자유공간을 나타내며 m=M+1은 반경이 a인 완전 도체 시린더를 나타낸다.

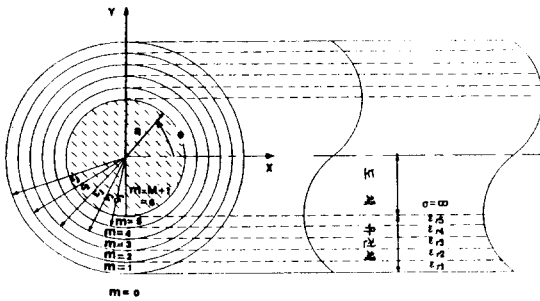


그림 1. 다층 유전체의 구조  
Fig. 1. The geometry of cylindrical multilayered dielectric.

외부에서 입사되는 파의 편파방향을 z방향으로 할때, 시린더 외부의 총전계 E<sub>z,0</sub>는 다음과 같은 급수형으로 표현된다.<sup>[3]</sup>

$$E_{z,0} = E^i + E^s = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} [J_n(k_0\rho) + S_n H_n^{(2)}(k_0\rho)] e^{jn\phi} \quad (1)$$

여기서, E<sup>i</sup>는 입사전계, E<sup>s</sup>는 산란전계, J<sub>n</sub>은 n차 1종 Bessel함수, H<sub>n</sub><sup>(2)</sup>는 n차 2종 Hankel함수, S<sub>n</sub>은 자유공간에서의 산란계수, k<sub>0</sub>는 자유공간의 전파상수이다.

m층 시린더 내에는 정재파가 형성되므로 전계는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$E_{z,m} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{m,n} J_n(k_m\rho) + B_{m,n} Y_n(k_m\rho)) e^{jn\phi} \quad (2)$$

여기서, m은 각 유전층의 번호를 나타내고, Y<sub>n</sub>은 n차 2종 Bessel함수이며, k<sub>m</sub>은 유전체 내에서의 전파상수이다. 위상정합조건에 의해 벡터 파정수는 ρ-φ면에 놓여 있고, 계 벡터는 z에 대해 무관하고 ρ-φ에 따라 변화하므로 ∂/∂z=0이다. 따라서, 각 층에서 자계의 접선방향

성분은 전계를 ρ에 대해 미분함으로써 구해진다.

$$H_{\phi,0} = \frac{k_0}{j\omega\mu_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (j^{-n} J_n'(k_0\rho) + S_n H_n^{(2)'}(k_0\rho)) e^{jn\phi} \quad (3)$$

$$H_{\phi,m} = \frac{k_m}{j\omega\mu_m} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (A_{m,n} J_n'(k_m\rho) + B_{m,n} Y_n'(k_m\rho)) e^{jn\phi} \quad (4)$$

여기서, H<sub>φ,0</sub>는 자유공간에서의 자계이고, H<sub>φ,m</sub>은 유전층 m내에서의 자계이다.

자유공간과 유전체사이의 경계면 m=0, 1에 경계조건을 적용하면 다음관계식을 얻는다.

$$j^{-n} J_n'(k_0\rho_1) + S_n H_n^{(2)'}(k_0\rho_1) = A_{1,n} J_n'(k_1\rho) + B_{1,n} Y_n'(k_1\rho_1) \quad (5)$$

$$\frac{k_0}{\mu_0} (j^{-n} J_n'(k_0\rho_1) + S_n H_n^{(2)'}(k_0\rho_1)) = \frac{k_1}{\mu_1} (A_{1,n} J_n'(k_1\rho) + B_{1,n} Y_n'(k_1\rho_1)) \quad (6)$$

유전체층 사이에도 경계조건을 적용하면 다음 관계식을 얻는다.

$$A_{m-1,n} J_n'(k_{m-1}\rho_m) + B_{m-1,n} Y_n'(k_{m-1}\rho_m) = A_{m,n} Y_n'(k_m\rho_m) + B_{m,n} J_n'(k_m\rho_m) \quad (7)$$

$$A_{m-1,n} J_n'(k_{m-1}\rho_m) + B_{m-1,n} Y_n'(k_{m-1}\rho_m) = R_m (A_{m,n} J_n'(k_m\rho_m) + B_{m,n} Y_n'(k_m\rho_m)) \quad (8)$$

여기서 R<sub>m</sub> = √(ε<sub>m</sub>μ<sub>m-1</sub>/ε<sub>m-1</sub>μ<sub>m</sub>)이다.

(5), (6)식과 (7), (8)식에 대해 각 층의 계수를 다음층의 계수에 대한 연립방정식으로 정리하고 이를 행렬로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} -j^n \\ S_n \end{bmatrix} = \frac{-j^n k_0 \rho_1}{2} \begin{bmatrix} J_n(k_1\rho_1) H_n^{(2)'}(k_0\rho_1) - R_1 J_n'(k_1\rho_1) H_n^{(2)'}(k_0\rho_1) \\ J_n(k_1\rho_1) J_n'(k_0\rho_1) - R_1 J_n'(k_1\rho_1) J_n(k_0\rho_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1,n} \\ B_{1,n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} Y_n(k_1\rho_1) H_n^{(2)'}(k_0\rho_1) - R_1 Y_n'(k_1\rho_1) H_n^{(2)'}(k_0\rho_1) \\ J_n(k_1\rho_1) J_n'(k_0\rho_1) - R_1 Y_n'(k_1\rho_1) J_n(k_0\rho_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{1,n} \\ B_{1,n} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} A_{m-1,n} \\ B_{m-1,n} \end{bmatrix} = \frac{j^n k_{m-1} \rho_m}{2} \begin{bmatrix} J_n(k_m\rho_m) Y_n'(k_{m-1}\rho_m) - R_m J_n'(k_m\rho_m) Y_n(k_{m-1}\rho_m) \\ -J_n(k_m\rho_m) J_n'(k_{m-1}\rho_m) + R_m J_n'(k_m\rho_m) J_n(k_{m-1}\rho_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{m,n} \\ B_{m,n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

(9)식은 0, 1 매질사이의 경계조건을 만족하는 행렬 관계 식이고 (10)식은 m-1, m 매질사이의 경계조건을 만족하는 행렬관계식이다. (10)식의 특성행렬은 순환(recurrence) 관계를 갖고면서 m층의 특성행렬의 계수는 m-1 층의 특성행렬의 계수로 대체할 수 있으므로 다음과 같이 행렬들의 곱으로 표시할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} -j^{-n} \\ S^n \end{bmatrix} = -j(\pi/2)^M \prod_{m=1}^M (k_{m-1}\rho_m) \times \begin{bmatrix} W_{1,n} & X_{1,n} \\ Y_{1,n} & Z_{1,n} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} W_{M,n} & X_{M,n} \\ Y_{M,n} & Z_{M,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{M,n} \\ B_{M,n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서  $\begin{bmatrix} W_{L,n} & X_{L,n} \\ Y_{L,n} & Z_{L,n} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} W_{M,n} & X_{M,n} \\ Y_{M,n} & Z_{M,n} \end{bmatrix}$  은 각층의 특성 행렬을 나타낸다.

M+1층은 도체이므로 반경 a에서 전계의 접선성분은 존재하지 않는다. (2)식에 경계조건을 적용하면 (11)식은 다음과 같은 형태로 된다.

$$\begin{bmatrix} -j^{-n} \\ S^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{M,n} \\ -\frac{J'_n(k_M a)}{Y'_n(k_M a)} A_{M,n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} a_n & b_n \\ c_n & d_n \end{bmatrix} = -j(\pi/2)^M \prod_{m=1}^M (k_{m-1}\rho_m) \times \begin{bmatrix} W_{1,n} & X_{1,n} \\ Y_{1,n} & Z_{1,n} \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} W_{M,n} & X_{M,n} \\ Y_{M,n} & Z_{M,n} \end{bmatrix} \quad (13)$$

이다. 따라서 계수  $A_{M,n}$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$A_{M,n} = \frac{-j^{-n}}{a_n \frac{J'_n(k_M a)}{Y'_n(k_M a)} b_n} \quad (14)$$

도체 표면에서의 전류밀도는 Maxwell 방정식으로 부터 다음 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} J_z &= H_\phi |_{\rho=a} = \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \Big|_{\rho=a} \\ &= \frac{k_M}{j\omega\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{M,n} \left( J'_n(k_M a) - \frac{J'_n(k_M a)}{Y'_n(k_M a)} Y'_n(k_M a) \right) e^{jn\phi} \\ &= \frac{j2}{\pi\omega\mu^2 a} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{-j^{-n} e^{jn\phi}}{Y'_n(k_M a) a_n - J'_n(k_M a) b_n} \quad (15) \end{aligned}$$

도체표면에 유기되는 전류는 z방향성분만을 갖는다. 따라서 총 유기전류는 전류밀도를  $\phi$ 에 대하여 적분하므로써 구할 수 있다.

### III. 계산결과 및 고찰

#### 1. 완전 유전체의 경우

표 1은 계산에 적용된 몇가지 경우의 유전율 분포를 나타내고 있다. 유전체의 총 두께는 도체 시린더의 반경 a와 같게 하였다. 그림 2는 반경이 1λ일때 도체 시린더 주위의 전류밀도 분포에 대한 Harrington<sup>[4]</sup>의 계산결과와 분포 1의 계산결과를 비교한 것이다. 두 결과는 정확하게 일치함을 보여 주고 있다.

그림 2는 분포 2에 대한 계산결과로서 분포 1의 경우보다 전체적으로 많은 전류가 유기되어 부과효과가 우수함을 알 수 있다. 분포 3의 경우는 0.17-0.3λ, 0.42-0.56λ, 0.7-0.82λ 구간에서 분포 1보다 전류가 적게 유기된다. 그림 3은 분포 4에 대한 계산결과이다. 분포 4에서는 0.6λ에서 전류가 매우 강하게 유기되는 특성을 보이고 있다.

표 1. 각 층에서 유전율 분포

Table 1. dielectric distributions at each boundary.

유전율 경우	$\epsilon_{r1}$	$\epsilon_{r2}$	$\epsilon_{r3}$	$\epsilon_{r4}$	$\epsilon_{r5}$
분포 1	1	1	1	1	1
분포 2	2	3	4	5	6
분포 3	6	5	4	3	2
분포 4	6	2	6	2	6

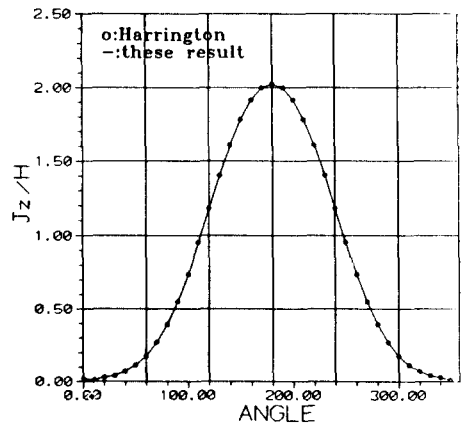


그림 2. 시린더 표면에서의 전류밀도

Fig. 2. Current densities on cylinder conductor.

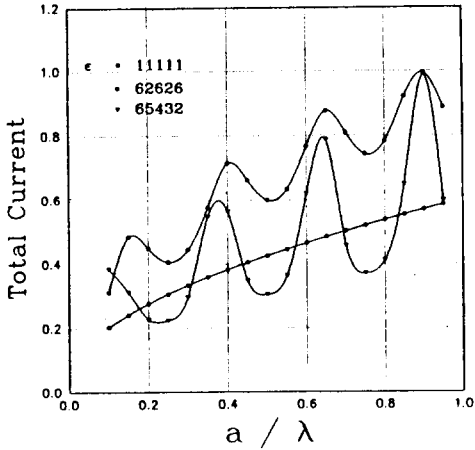


그림 3. 시린더 표면에서의 총 유기전류(분포 1, 2)  
Fig. 3. Total induced currents on the cylinder surface (case 1, 2).

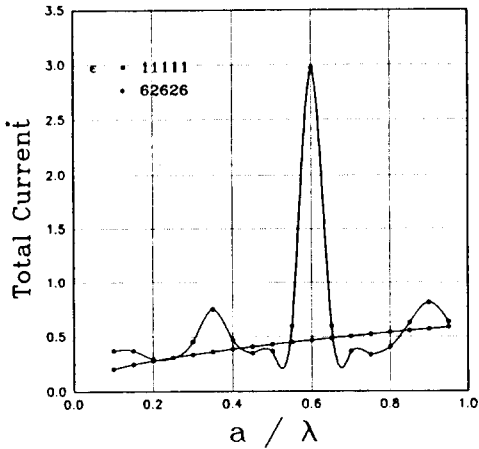


그림 4. 시린더 표면에서의 총 유기전류(분포 3)  
Fig. 4. Total induced currents on the cylinder surface (case 3).

2. 손실이 있는 유전체

유전체에 손실이 있는 경우는  $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 - j\sigma/\omega$ 로 되고, 이 경우는 Toitl<sup>[5]</sup>가 제안한 Bessel 함수의 알고리즘을 이용하여 계산하였다. 유전층의 총 두께는  $0.1\lambda$ 로 하였다. 유전율 분포는 표 1에 따랐고 도전율은 표 2와 같이 선택하였다.

그림 5는 도전율의 분포를 표 2의 분포 A로 하고 유전율은 표 1과 같이 하였을 경우의 계산결과이다. 전반적으로 전류가 적게 유기됨을 알 수 있다. 특히 유전율 분포가 도체 시린더에 접근할수록 감소할 때 좋은 차폐특성을

표 2. 각 층에서 도전율 분포

Table 2. Conductivity distributions at each boundary.

경우 \ 도전율	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_5$
분포 A	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
분포 B	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
분포 C	0.05	0.04	0.03	0.02	0.01

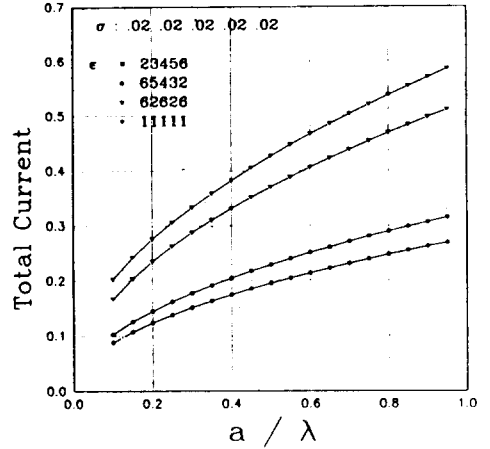


그림 5.  $\sigma=0.02$  일때 시린더 표면에서의 총 유기전류(분포 1, 2, 3)  
Fig. 5. Total induced currents on the cylinder surface (case 1, 2, 3) When  $\sigma=0.02$ .

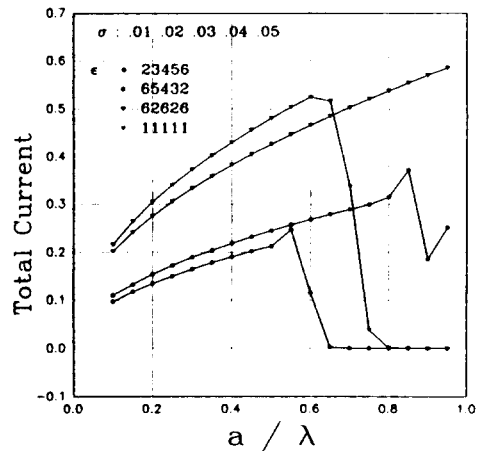


그림 6.  $\sigma=0.01 \sim 0.05$  일때 시린더 표면에서의 총 유기전류(분포 1, 2, 3)  
Fig. 6. Total induced currents on cylinder the surface (case 1, 2, 3) When  $\sigma$  increase from 0.01 to 0.05.

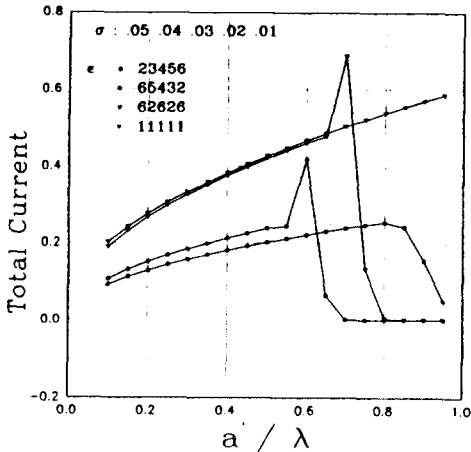


그림 7.  $\sigma=0.05\sim 0.01$  일때 시린더 표면에서의 총 유전전류(분포 1, 2, 3)  
 Fig. 7. Total induced currents on the cylinder surface (case 1, 2, 3) When  $\sigma$  decreases from 0.05 to 0.01.

보인다. 그림 6은 표 1과 표 2의 분포 B를 조합한 경우로서 유전율이 분포 4일 때에는 특정 구간에서 분포 1보다 더 많은 전류가 유전되고 분포 2와 분포 3의 경우에는 적은 전류가 유전되는 특성을 보인다. 그림 7은 표 1과 표 2의 분포 C를 이용하여 유전되는 전류를 나타낸 것인데 유전율이 분포 4인 경우  $0.7\lambda$  부근에서 전류가 강하게 유전되며, 분포 2와 분포 3의 경우에는 분포 1보다 적은 전류가 유전되는 차폐특성을 보이며, 유전율이 분포 3인 경우에 가장 적은 전류가 유전됨을 알 수 있다.

V. 결 론

원통형 다층 유전체의 전자파 차폐특성을 해석하였다.

분포 2의 경우 손실이 없을 때 전구간에서 투과 효과가 우수했으며 분포 3의 경우는 손실이 있을때와 없을때 모두 차폐효과가 우수했다. 분포 4의 경우 손실이 없을때는  $0.6\lambda$ 부근에서 매우 강한 전류가 유전되었으며 손실이 존재할때는 특정 구간에서 투과 효과를 나타냈다.

이상의 결과는 원통형 구조물의 EMC, 케이블 차폐 또는 레이돔등의 연구에 큰 도움이 될 것이다. 앞으로 비균질, 비등방성 다층 유전체들에 대한 전자파 차폐특성에 관한 연구도 이루어져야 할 것이다.

参 考 文 献

- [1] J. A. Kong, *Electromagnetic Wave Theory*, Chap. 3, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.
- [2] S. Tominaga, M. Tanaka and Y. Miyazaki, "Electromagnetic absorption properties of plastic plate with resistance and conductance partiles", *EMCJ* 82-13, pp. 25-30, 1982.
- [3] G. Arfken, *Mathematical Methods for Physicals*, 3rd edition, Academic Press, Inc., 1985.
- [4] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1961.
- [5] Cornelis F. Du Toit, "The numerical computation of Bessel of Functions of the First and Second kind for integer order and complex arguments", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-38, pp. 1341-1349, Sept. 1990.

著 者 紹 介



柳 晃 (正會員)  
 1965年 1月 9日生. 1987年 2月 한양대학교 전자통신과 졸업(공학사). 1990年 2月 한양대학교 전자통신과 대학원 졸업(공학석사). 1990年 3月 ~현재 한양대학교 박사과정 재학중. 주관심분야는 안테나 및 전자파 이론 EMI / EMC 등임.

李 相 高 (正會員) 第 28卷 第 10號 A編 參照  
 현재 한양대학교  
 전자통신공학과 교수