

論文98-35D-5-4

평행평판 도파관내 수평자기쌍극자에 대한 개선된 단순함수형태의 그린함수

(Improved closed-form Green's functions for a horizontal magnetic dipole in a parallel-plate waveguide)

李永淳*, 權鎬祥**, 趙榮基***

(Young-Soon Lee, Ho-Sang Kwon, and Young-Ki Cho)

요 약

평행평판 도파관(PPW)내의 수평자기쌍극자에 대한 공간영역의 그린함수들이 spectral 그린함수들을 2단계로 근사화(two-level approximation)한 개선된 단순함수형태로 표현되어진다. 본 논문에서 2단계 근사화를 통해 구해진 단순함수형태의 그린함수의 결과와 기존의 1단계 근사화(one-level approximation)로 구해진 단순함수형태의 그린함수의 결과와 비교하였을 때, 본 논문의 그린함수 표현 식이 넓은 주파수 범위와 전 공간 영역에서 기존의 그린함수 표현식보다 정확한 그린함수의 결과 값을 주고 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 논문에서 구해진 단순함수형태의 그린함수 표현식이 개구를 통한 PPW내로의 전자파 펄스(EMP)의 결합문제 또는 반사판을 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나등을 수치해석하기 위하여 모멘트법(MOM)에 사용되어질 경우, 수치해석시 계산시간의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대되어진다.

Abstract

Spatial Green's functions for a horizontal magnetic dipole in a parallel-plate waveguide are expressed in an improved closed-form with two-level approximation of the spectral Green's functions. The results evaluated by the present closed-form Green's function with two-level approximation are compared with those obtained the previous closed-form Green's function with one-level approximation. The present results are observed to be more accurate than the previous results over wide frequency range as well as whole spatial range. The combination of the present closed-form Green's functions and the moment method may help in analyzing the problem of EMP coupling through an aperture into a parallel-plate waveguide and the microstrip slot antenna with a reflector.

* 正會員, 金烏工科大學校 電子通信工學科

(Dept. of Communication, Kum-oh National University of Technology)

** 正會員, 大宇電子 RF 프로젝트팀

(RF Project Team, DAEWOO Electronics)

*** 正會員, 慶北大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics, Kyungpook National University)

接受日字:1997年6月28日, 수정완료일:1998年4月23日

I. 서 론

전자파 펄스(EMP)의 침투에 의해 피해를 입기 쉬운 전자장비(예로 항공기 시스템의 전자장비)의 보호 및 대책수립(EMC/EMI)을 위하여, 개구(aperture)를 통한 평행평판 도파관(PPW) 또는 공동(cavity) 내부로의 EMP침투문제 해석은 중요한 연구중의 하나이다^[1]. 이와 같은 전자기적 결합문제의 해석을 위하여 보편적으로 가장 많이 사용되어진 수치 해석적 방법이

모멘트법(MOM)이다. 일반적으로 해석구조가 적당한(moderate) 크기(2차원적으로 파장의 수배 정도의 크기)에 대한 수치 해석적 방법으로 모멘트법이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있으나, 기존의 연구^[1~2]에서 사용된 급수식 형태의 그린함수 표현식이 원점과 관찰점의 거리에 따라 수렴도가 느린 경우가 생겨나므로 여전히 행렬 요소들의 계산시 많은 시간이 소모되어진다.

기존의 연구들에서 Rahmat-Samii^[1]는 개구를 통한 평행평판 도파관 내부로의 EMP침투 문제의 해석을 위하여 개구의 등가 미지의 자기 전류에 대한 미적분 방정식(integro-differential equation)을 구하고 모멘트법을 사용하여 그 해를 구했고, 이 미적분 방정식에 사용된 공간영역 그린함수는 PPW내부의 단위크기를 갖는 무한소의 수평 자기 쌍극자(infinitesimal horizontal magnetic dipole)에 의한 무한개의 영상원으로 전개(infinite image expansion)한 표현식을 사용하였다. 그러나 이와 같은 영상 전개식은 쌍극자로부터 관찰점이 먼 경우 항들의 수렴속도가 느리게 되므로^[3~4], 쌍극자와 관찰점의 거리가 먼 영역에서의 그린함수 값을 구하는데 많은 계산시간이 소모된다는 단점을 지니고 있다. 반면에 K.Itoh^[2]는 이와 유사한 문제 형태인 반사판(reflector)을 가진 슬롯(slot) 안테나의 구조에 대하여 슬롯의 미지 자기 전류에 대한 자계 적분방정식을 얻고 모멘트법을 사용하여 그 해를 구하였는데, 이 경우 그린함수는 모드의 무한급수 전개식(infinite modal expansion)을 사용하였다. 또한 이와 같은 모드 전개식은 쌍극자로부터 관찰점이 가까운 경우 항들의 수렴속도가 매우 느리게 되므로^[3~4], 쌍극자와 관찰점이 아주 가까운 영역에서 모드에 의한 전개식을 그린함수로 사용하는 데는 문제점이 있을 수 있다.

최근 그린함수 표현식의 이와 같은 문제점들을 보완하기 위해 PPW내의 수평 전기 쌍극자(HED) 및 수평 자기 쌍극자(HMD)에 대한 그린함수를 쌍극자와 관찰점간의 거리에 관계없이 빠르게 수렴하는 단순함수형태(closed-form)로 표현할 수 있는 복소영상법(complex image method)^[4~5]들이 제시되었다. Yang^[4]은 PPW내의 수평 전기 쌍극자에 대한 벡터 및 스칼라 포텐셜의 단순함수형태의 그린함수를 유도하였으나, 그 표현식에서 복소 영상들에 의한 그린함수 표현식에 z 변수가 포함되어 있지 않아 이 그린함수

의 표현식으로부터 얻어진 벡터 포텐셜로부터 자계의 접선 성분($H = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \Delta$)을 구하는 과정에서 복소 영상들에 의한 그린함수가 기여하지 못한다는 문제점이 있다. 참고문헌 [5]에서는 복소 영상들에 의한 그린함수 표현식에 z 변수가 포함되어있지 않았을 때의 문제점을 지적하고, PPW내의 수평 자기 쌍극자(HMD)에 대한 벡터 및 스칼라 포텐셜의 그린함수를 복소 영상들에 의한 그린함수 표현식에 z 변수가 포함된 단순함수형태(closed-form)로 구할 수 있는 개선된 방법을 제시하였다. 이와 같은 그린함수 표현식을 급수 형태가 아닌 단순함수형태(closed-form)로 구하는 방법을 “복소영상법”이라고 부르는 이유는 스펙트럴(spectral) 그린함수를 해석적 Hankel 역변환이 되어질 수 있도록 몇 개의 복소지수함수 합으로 근사화하기 때문이다.

그러나 기존의 복소영상법들^[4~5]은 spectral 그린함수를 복소지수함수의 합으로 근사화하는 과정에서 결정해야 하는 매개변수들(특히 근사적분경로의 truncation point T_0)의 선택이 어렵고, 사전에 근사를 통하여 비교적 정확히 근사화할 수 있는 매개변수들을 선택해야하는 불편한 점은 여전히 문제점으로 지적될 수 있다. 최근에 Aksun^[6]은 MMIC(monolithic microwave integrated circuit)와 같이 다소 복잡한 다층구조의 문제 해석을 위한 그린함수를 단순함수형태로 유도하는 과정에서 사전에 spectral 그린함수의 형태를 조사해야 하는 단점을 제거하기 위한 방법을 제안하였다. Askun은 그의 논문^[6]에서 제시한 방법을 2단계 근사화 방법(2-level approximation)이라고 부르는데 그 이유는 기존의 복소 영상법들이 spectral 그린함수를 1단계(1-level)로 근사화한 반면에, 그는 2단계(2-level)로 근사화하였기 때문이다.

본 논문에서는 개구를 통한 PPW내부로의 EMP침투 문제의 효율적인 수치해석을 위하여, PPW내에 위치한 수평 전기 쌍극자에 대한 벡터 및 스칼라 포텐셜의 그린함수를 2단계 근사화 방법에 근거를 둔 단순함수형태로 구하는 방법을 제시한다. 또한 Askun은 spectral 그린함수를 복소지수함수의 합으로 근사화하는 방법으로 GPOF법^[7]을 사용하였으나, 본 논문에서는 GPOF법 보다 쉬운 방법이면서 보편적으로 가장 많이 사용되어지는 Prony법^[8]을 사용한다.

먼저 II장에서는 기존의 1단계 근사화 방법을 소개하고, 기존의 방법을 사용할 경우 매개변수 T_0 의 선

택에 어려움이 발생하는 이유가 논의된다. III장에서는 기존의 1단계 근사화 방법이 갖는 문제점을 해소하면서, 기존의 그린함수와 비교하여 보다 정확한 값을 줄 수 있는 단순함수형태의 그린함수 표현식을 구하기 위해 2단계 근사화 방법에 근거를 둔 개선된 복소영상법을 제시한다. 그리고 IV장에서는 논문이 제안한 방법의 타당성을 검토하기 위해 그린함수의 결과 값을 넓은 주파수 영역에서 기존의 그린함수 값과 비교하여 제시하고, 기존의 방법보다 정확한 그린함수 값을 주는 개선된 이유가 논의되어진다.

II. 기존의 1단계 근사화 방법

일반적으로 전자장 수치해석에 있어서 기존의 전계 및 자계 적분방정식^[1,2] 보다 정확하고 많은 이점을 가지는 적분방정식이 혼합 포텐셜 적분방정식(mixed-potential integral equation(MPIE))^[9,10]인 것으로 알려져, 최근에는 적분방정식으로 MPIE를 사용하는 것이 보편적인 추세이다. 그림 1은 균일한 유전체로 채워진 높이 h의 PPW내에 수평 자기 쌍극자가 있는 경우를 도시하였는데, 이 구조는 PPW의 윗면의 개구를 통한 전자기적 결합문제의 해석에 사용되어질 그린함수를 구하기 위한 등가해석 구조이다. (등가원리에 의해 z'=0에 위치해야 한다.)

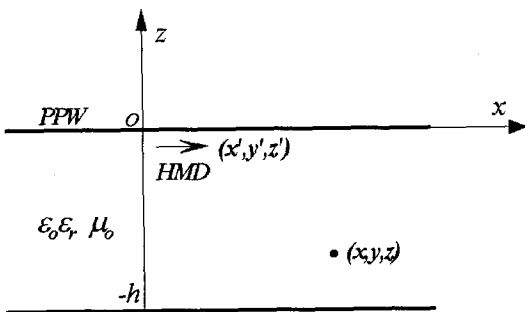


그림 1. 균질한 유전체로 채워진 평행평판 도파관 내부에 위치한 x-방향의 수평 자기쌍극자
 Fig. 1. An x-directed horizontal magnetic dipole located in a parallel-plate waveguide filled with a homogeneous dielectric.

이 장에서는 개구를 통한 PPW 내부로의 EMP 침투문제의 해석을 위하여 MPIE에 사용되어질 공간영역의 그린함수를 (즉, 그림 1과 같은 해석구조에서 원천점 (x', y', z')에 수평 자기 쌍극자 및 자하(mag-

netic charge)가 위치하고 있는 경우에 대한 각각의 자기 벡터 및 스칼라 포텐셜의 그린함수를) 구하는 기존의 모든 방법들을 소개하고, 특히 단순 함수형태 표현식의 그린함수를 구한 1단계 근사화 방법을 사용하는 복소영상법의 소개 및 문제점을 논의하고자 한다.

그림 1과 같은 평판 구조(planar geometry)에서의 그린함수는 일반적으로 Sommerfeld 적분으로 불리는 Hankel 역변환 형태의 적분식으로 표현되어지므로, 먼저 spectral 영역에서의 그린함수를 구한 후 공간영역의 그린함수를 구하는 적분 변환법^[11]을 사용하여 벡터 포텐셜의 그린함수 $G_{V_{qm}}^{\#}$ 와 스칼라 포텐셜의 그린함수 $G_{V_{qm}}$ 을 구하면 식(1)과 같다.

$$\frac{4\pi}{\epsilon_0\epsilon_r} G_F^{\#} = 4\pi\mu_0 G_{V_{qm}} \quad (1)$$

$$= \int_{SIP} \frac{1}{j2k_z} F(k_z) e^{jk_z(z-z')} H_0^{(2)}(k_\rho \rho) k_\rho dk_\rho$$

여기에서

$$F(k_z) = \frac{(1 + e^{j2k_z z'}) (1 + e^{-j2k_z(z+h)})}{1 - e^{-j2k_z h}}, \quad z \leq z'$$

$k_z^2 = k^2 - k_\rho^2$, $k^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r$, 그리고 SIP는 Sommerfeld 적분 경로이다. 식(1)과 같은 Sommerfeld 적분 형태의 그린함수 표현식으로 부터 그린함수 값을 구하기 위하여 수치 적분을 할 경우, 피적분 함수내에 포함된 Hankel 함수의 고진동(highly oscillatory) 특성 때문에 많은 계산시간이 소모되어진다.

적분식 (1)로부터 급수 전개식 형태의 그린함수 표현식을 구할 수 있는데, 식(1)에서 spectral 그린함수 $F(k_z)$ 를 Taylor 급수로 전개하고 Sommerfeld 항등식을 사용하여 무한 영상 급수전개식(infinite image expansion)을 얻을 수 있다^[5]. 또한 식(1)의 적분을 복소 k_ρ (적분변수)-평면의 아래 반평면(lower half-plane)에 존재하는 모든 극점(pole)들에 대해 유수정리를 사용하면 무한 모드의 급수전개식(infinite modal expansion)을 얻을 수 있다^[5]. 이와 같은 급수식 형태의 그린함수 표현식들은 서론에서 언급된 바와 같이 전원점과 관찰점간의 거리에 따라 수렴도가 느리게 되므로, 실제 전자기적 문제해석에 있어서는 관찰점이 전원점과 가까운 공간 영역에서는 영상 급수전개식을, 먼 공간 영역에서는 모드 급수전개식을 그린함수 표현식으로 사용하여 왔다.

그러나 급수식형태의 표현식과는 달리 복소영상법^[4,5]으로 구해진 단순 함수형태의 그린함수의 표현식은 전원점과 관찰점과의 거리에 관계없이 빠르게 수렴하므로 기존의 그린함수 표현식중에서 가장 유용하다고 할 수 있다. 이와 같은 복소영상법의 주된 개념은 spectral 그린함수 $F(k_z)$ 를 주어진 근사 경로를 따라 샘플링된 값으로부터 몇 개의 복소 지수함수의 합으로 근사화한 후 식(1)에 대입하여 해석적 Hankel 역변환이 가능하도록(즉, Sommerfeld 항등식을 사용할 수 있도록)하는데 있다. 그림 2는 기존의 복소영상법에서 1단계 근사화에 사용되는 근사 적분 경로이다.

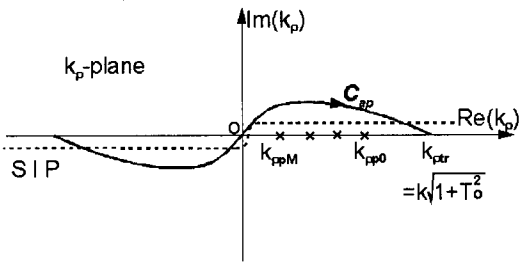


그림 2. spectral 그린함수의 1단계 근사화에 사용되는 근사 경로

Fig. 2. Approximation of the spectral Green's function.

C_{ap} : 근사 적분 경로(approximation path)

그림 2에서 보는 바와 같이 기존의 복소영상법에서는 Sommerfeld 적분 경로 SIP를 근사 적분 경로 C_{ap} 로 변경(deformation)하여 사용하는데, 그 이유는 적분경로의 종단점(k_{rtr})이후의 spectral 그린함수 값을 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였기 때문이다. 따라서 기존의 복소영상법^[4]에서는 가급적 큰 T_0 를 선택하도록 권하고 있다.

그러나 EMP문제를 해석하기 위해서는 높은 주파수 범위까지 적용 가능해야 하는데, 이 경우 근사화에 필요한 매개 변수(즉, 종단점 T_0 와 복소 지수 함수의 개수 N)의 선택에 어려움이 있다는 것은 여전히 문제점으로 지적될 수 있다^[5]. 실제로 기존의 1단계 근사화 방법을 사용하여 높은 주파수 영역에서 spectral 그린함수를 정확하게 근사화할 수 있는 T_0 를 선택하는 것이 매우 어렵다는 사실을 확인할 수 있었다. 그림 3에서는 참고 문헌 [1]의 해석구조($h=3.48m$, $\epsilon_r=1.0$, EMP의 spectral width : 1GHz, $z'=0$)

에 대해 주파수 1GHz에서 가장 적절하다고 판단되어지는 T_0 의 값을 선택한 후, 기존의 복소영상법(1단계 근사화 방법)으로 구해진 단순함수 형태의 공간영역 그린함수 값의 결과를 정확한 그린함수 값과 비교하여 제시하였다. 본 논문에서는 그린함수의 정확한 결과값으로 ρ 가 작은 영역($\rho < \lambda$)에서는 영상에 의한 급수 전개식을 사용하고, ρ 가 큰 영역($\rho > \lambda$)에서는 모드의 급수전개식을 사용하여 구하였다.

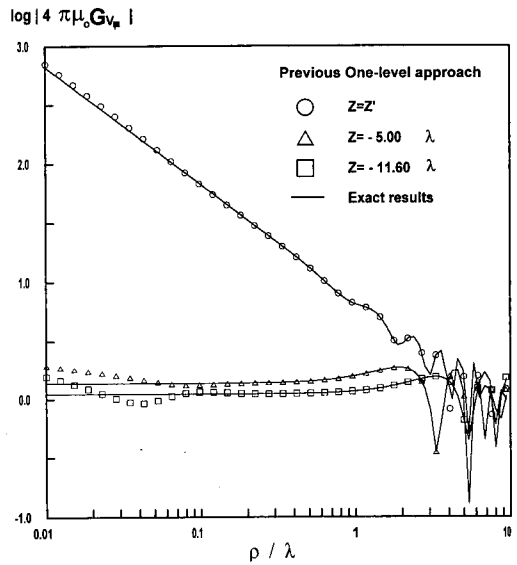


그림 3. 기존의 복소영상법(1단계 근사화 방법)을 사용하여 구한 단순함수형태의 공간영역 그린함수 결과의 크기 (주파수 : 1GHz)

Fig. 3. Amplitude of Closed form spatial Green's function obtained by use of the previous complex image method (freq. : 1GHz).

그림 3에서 제시된 결과는 비교적 정확하게 근사화된 spectral 그린함수를 사용하여 구해진 공간 영역의 그린함수 결과임에도 불구하고 $\rho=0$ 와 가까운 공간영역에서 큰 오차를 보임을 알 수 있는데, 이 결과로부터 spectral 영역에서의 작은 오차가 공간 영역에서는 큰 오차를 준다는 사실을 알 수 있다.

사용 주파수가 높아짐에 따라 T_0 를 작게 선택하는 것이 합리적인 견해이다^[5]. 따라서 T_0 가 작게 선택된 경우 T_0 이후 spectral 그린함수 값이 남아있을 수 있으므로, 기존의 1단계 근사화 방법에서처럼 T_0 이후의 spectral 그린함수 값을 무시할 수 있다고 가정하는 데는 높은 주파수의 경우 문제점이 있다고 사료되어

진다. 즉, 높은 주파수 영역에서 T_0 의 선택이 어려운 이유는 기존의 1단계 근사화 방법으로는 T_0 이후의 남아있는 spectral 그린함수 값의 기여를 고려해 넣을 수 없기 때문인 것으로 사료되어진다.

III. 2단계 근사화 방법에 근거를 둔 개선된 복소영상법

전술한 바와 같이 1단계 근사화 방법에 근거를 둔 기존의 복소영상법에서는 spectral 그린함수를 가장 적합하게 근사화할 수 있는 매개 변수 T_0 를 사전에 조사하여 결정해야하는 불편한 점과, 또한 주파수가 높아질 경우 적합하게 근사화된 spectral 그린함수가 공간영역에서 큰 오차를 나타내 보인다는 사실은 문제점들로 지적될 수 있다. 따라서 이 장에서는 기존의 복소영상법이 갖는 이와 같은 문제점들을 해소하면서 공간영역에서 기존의 결과보다 정확한 결과를 줄 수 있는 단순 함수형태의 공간영역 그린함수를 유도하기 위해, Aksun^[6]이 제안한 2단계 근사화 방법에 근거를 둔 개선된 복소영상법을 제시하고자 한다. 그림 4에서는 2단계 근사화 방법에서 사용되어질 근사 적분 경로를 제시하였는데, 1단계 근사화 방법과는 달리 근사 적분 경로로 C_{ap1} 과 C_{ap2} 를 따라 2단계를 거쳐 spectral 그린함수가 근사화되어짐을 알 수 있다. 이와 같은 2단계 근사화 방법을 본 논문에서 채택한 이유는 기존의 1단계 근사화 방법에서 T_0 이후 무시된 spectral 함수의 기여를 2단계 근사화 방법으로 고려해 넣을 수 있을 것으로 사료되기 때문이다.

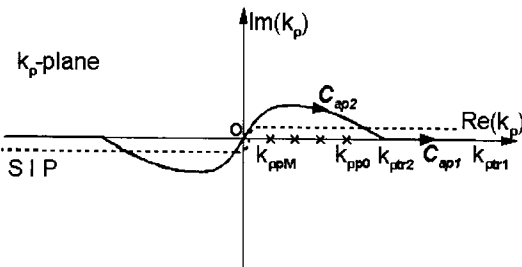


그림 4. spectral 그린함수의 2단계 근사화에 사용되는 근사경로

Fig. 4. Approximation path used in two-level approximation of the spectral Green's function.

본 논문에서 제시하고자 하는 2단계 근사화 방법에

근거를 둔 개선된 복소영상법을 단계적으로 설명하면 다음과 같다:

첫째, 먼저 spectral 그린함수 $F(k_z)$ 를 복소지수함수의 합으로 근사화 하기 전에 $F(k_z)$ 로 부터 준정적 기여(quasi-static contribution) F_{qs} 와 전파모드의 기여 F_{pm} 을 아래식과 같이 구하여 $F(k_z)$ 에서 빼준다.

$$F_s(k_z) = F(k_z) - F_{qs} - j2k_z F_{pm} e^{-jk_z(z-z')} \quad (2)$$

여기에서

$$F_{qs} = \lim_{k_p \rightarrow \infty} F(k_z) = 1 + e^{jk_z z'}$$

$$F_{pm} = \sum_{n=0}^M \frac{2k_{\rho n}}{k_p^2 - k_{\rho n}^2} \cdot \lim_{k_p \rightarrow k_{\rho n}} (k_p - k_{\rho n}) \frac{1}{j2k_z} F(k_z) e^{jk_z(z-z')}$$

그리고 $k_{\rho n}$ 은 복소 k_p -평면에서의 실극점들(real poles)이며, M 은 실극점(전파모드)의 개수이다. 식(2)와 같이 처리된 spectral 그린함수 $F_s(k_z)$ 는 $F(k_z)$ 로부터 준정적 기여항 F_{qs} 가 빠져 있어 빠르게 수렴(fast convergent)하고, 전파모드의 기여항 F_{pm} 이 제거되어 서서히 변화(well-behaved)하게 되므로 $F_s(k_z)$ 는 $F(k_z)$ 에 비해 근사화하기에 쉬운 spectral 함수 형태이다.

둘째, Prony 방법^[8]을 이용해서 $F_s(k_z)$ 를 2단계(two-level)로 나뉘어진 근사경로를 따라 복소지수함수의 합으로 근사화한다. 첫 번째 근사화는 그림 4의 근사경로 C_{ap1} 을 따라서, 두 번째 근사화는 그림 4의 근사경로 C_{ap2} 를 따라서 이루어진다.

근사경로 C_{ap1} 과 C_{ap2} 에 대한 매개 변수 관계식은 식(3) 및 식(4)와 같이 주어진다.

근사경로 C_{ap1} 에 대하여

$$k_z = -jk [T_{\omega} + t], \quad 0 \leq t \leq T_{\omega} \quad (3)$$

근사경로 C_{ap2} 에 대하여

$$k_z = k [-jt + (1 - \frac{t}{T_{\omega}})], \quad 0 \leq t \leq T_{\omega} \quad (4)$$

셋째, 2단계 근사화는 구체적으로 다음과 같이 이루어진다:

먼저 T_{ω} 를 결정해야 하는데, T_{ω} 는 기존의 1단계 근사화 방법^[4]에서의 종단점 T_0 와 동일하므로 II장

에서 언급한 바와 같이 주파수가 높아짐에 따라 T_{ω} 를 작게 선택하는 것이 바람직하다. 따라서 T_{ω} 를 $T_{\omega} = M/k$ 의 개략적인 관계식으로 결정한다. (M 은 전파모드의 개수이고 $k = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon}$ 이다.) T_{ω} 이후의 그린함수는 값이 아주 작고 근사경로 C_{apl} 을 따라서 빠르게 영(zero)의 값으로 수렴하게 되는 것이 일반적인 경향이므로 T_{ω} 은 T_{ω} 의 3~5배 정도의 값으로도 충분하다. 따라서 T_{ω} 은 $T_{\omega} = NT_{\omega}$ ($N=3\sim 5$)의 관계식으로 결정한다. 이와 같이 결정된 T_{ω} 과 T_{ω} 에의해 식(3)으로 주어진 근사경로 C_{apl} 을 따라서 $F_r(k_z)$ 를 식(5)와 같이 먼저 1단계로 몇 개의 복소지수함수의 합으로 근사화한다.

$$F_{c1}(k_z) (\cong F_r(k_z) \text{ for } C_{apl}) = \sum_{n=1}^{N_1} a_{1n} e^{-b_{1n}k_z} \quad (5)$$

여기에서 근사경로 C_{apl} 을 따라서 spectral 함수는 C_{apl} 에서와는 달리 변곡점이없이 빠르게 영의 값으로 수렴하므로 $N_1=2\sim 4$ 정도로 충분하다. 식(5)로 근사화된 함수 $F_{c1}(k_z)$ 를 원래의 $F_r(k_z)$ 에서 빼주고 근사경로 C_{apl} 을 따라서 식(6)과 같이 2단계로 근사화한다.

$$F_{c2}(k_z) (\cong F_r(k_z) - F_{c1}(k_z) \text{ for } C_{apl}) = \sum_{n=1}^{N_2} a_{2n} e^{-b_{2n}k_z} \quad (6)$$

여기에서 C_{apl} 을 따르는 spectral 그린함수는 전파모드 극점에 영향을 받아 변곡점이 존재하므로, 어떠한 spectral 함수의 변화라도 근사화 할 수 있도록 N_2 를 전파모드 극점의 개수로 선택한다. 이상에서 언급된 바와 같이 제안된 2단계 근사화 방법에 의해 식(1)의 피적분 함수인 $F(k_z)$ 는 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(k_z) = F_{qs} + F_{c1} + F_{c2} + j2k_z F_{pm} e^{-jk_z(z-z')} \quad (7)$$

식(7)을 식(1)에 대입하고 Sommerfeld 항등식과 유수 정리를 사용하면 해석적 Hankel 역변환 되어 공간 영역에서의 단순함수형태 그린함수를 식(8)과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{4\pi}{\epsilon_0\epsilon_r} G_F^{qs} = 4\pi\mu_0 G_{Vqm} = G_{qs} + G_{c1} + G_{c2} + G_{pm} \quad (8)$$

여기에서

$$G_{qs} = \frac{e^{-jkr_1}}{r_1} + \frac{e^{-jkr_2}}{r_2} \quad , \quad r_1 = \sqrt{\rho^2 + (z-z')^2} \quad (9)$$

$$\quad , \quad r_2 = \sqrt{\rho^2 + (z+z')^2}$$

$$G_{c1} = \sum_{n=1}^{N_1} a_{1n} \frac{e^{-jkr_n}}{r_{1n}} \quad , \quad r_{1n} = \sqrt{\rho^2 + (z-z'+jb_{1n})^2} \quad (10)$$

$$G_{c2} = \sum_{n=1}^{N_2} a_{2n} \frac{e^{-jkr_n}}{r_{2n}} \quad , \quad r_{2n} = \sqrt{\rho^2 + (z-z'+jb_{2n})^2} \quad (11)$$

$$G_{pm} = \frac{\pi}{jh} \sum_{n=0}^M \epsilon_n H_0^{(2)}(k_{\rho n} \rho) \cos \frac{n\pi z'}{h} \cos \frac{n\pi z}{h} \quad (12)$$

그리고 ϵ_n 은 Neumann 상수 ($\epsilon_n=1$, for $n=0$; $\epsilon_n=2$, for $n \neq 0$)이다. 식(8)은 본 논문이 제시한 개선된 복소영상법(2단계 근사화방법)에 의해 구해진 최종 단순함수형태의 공간영역 그린함수 표현식이다. 식(8)에서 각항의 그린함수 의미를 살펴보면, $z'=0$ 인 경우(등가원리에 의해) G_{qs} 는 준정적 기여($F_{qs} \rightarrow 2$ as $k_{\rho} \rightarrow \infty$)에 의한 공간영역 그린함수로 자기쌍극자 자신에 의한 그린함수의 2배(즉 위도체판에 의한 영상 자기쌍극자를 포함하여 2배)가 됨을 알 수 있고 이와 같은 G_{qs} 는 관찰점이 아주 가까운 영역에서 지배적인 그린함수 값을 주게 된다. 이와는 달리 G_{pm} 은 전파모드만을 고려한 모드 급수 전개식임을 알 수 있어, 관찰점이 아주 먼 영역에서 그린함수 값을 결정짓는 항임을 알 수 있다.

반면에 G_{c1} 과 G_{c2} 는 spectral 영역에서 2단계 근사화로 얻어진 복소지수함수의 복소지수 및 복소계수가 각각 공간영역에서는 식(10)과 (11)에서 보는 바와 같이 복소위치 및 복소크기에 해당되므로, 이와 같은 그린함수들을 복소영상(complex image)에 의한 그린함수 결과로 부른다. 특히 G_{c1} 과 G_{c2} 는 관찰점이 쌍극자로 부터 먼 영역과 가까운 영역을 제외한 중간(intermediate)영역에서 그린함수 값을 결정해주는 항들이다. 그러므로 식(8)로 표현된 단순함수형태의 그린함수식은 영상에 의한 급수 전개식과 모드에 의한 급수 전개식의 이점을 모두 부각시키면서 쌍극자와 관찰점의 거리에 관계없이 빠르게 수렴하는 그린함수 표현식이라고 할 수 있다.

본 논문에서 구해진 최종 단순함수형태의 그린함수 표현식인 식(8)과 기존의 복소영상법으로 구해진 표현식(참고문헌 [4]의 식(10))과의 주된 차이점은 복소영상들에 의한 그린함수항이 두 개의 항들(즉 G_{c1} 과 G_{c2})로 구성되어 있다는 것이다. 본 논문에서의 G_{c2} 는 참고문헌 [4]의 식(10)에서의 G_c 와 동일한 항이고, G_{c1} 은 기존의 1단계 근사화 방법에서 무시되었던 T_{ω} 이후의 spectral 그린함수의 기여를 고려해

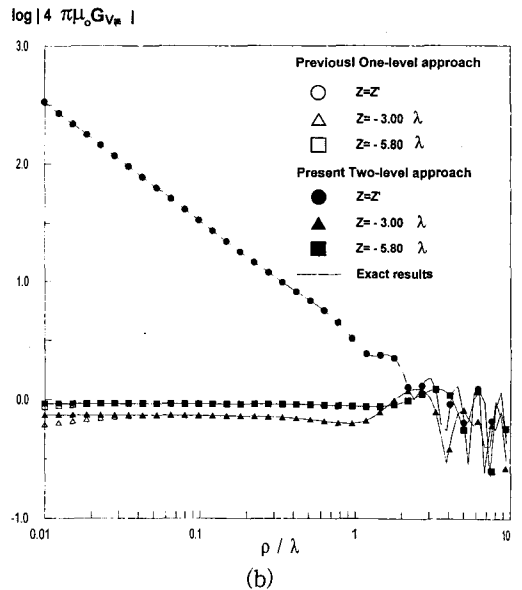
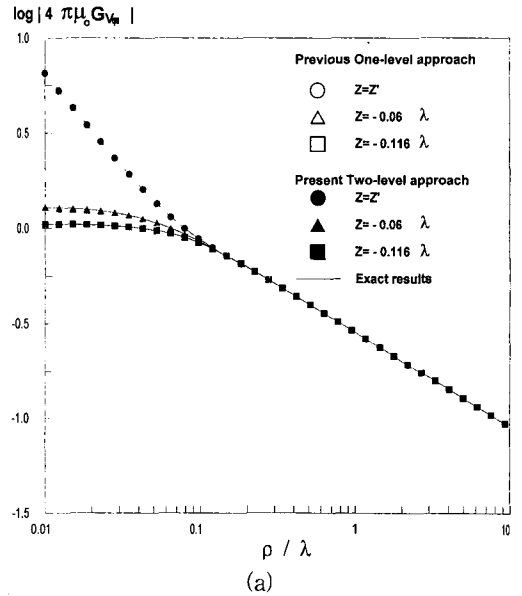
넣은 항이다.

IV. 수치 결과 및 결론

본 논문에서 제안된 복소영상법(2단계 근사화 방법)의 타당성을 확인하기 위하여, 참고문헌 [1]의 해석 구조($h=3.48m$, $\epsilon_r=1.0$, EMP의 spectral width: 1GHz, $z'=0$)에 대해 공간영역의 그린함수를 단순함수 형태로 구하여 보았다. 그림 5에서는 예로 주파수 $f=10MHz$, $f=500MHz$ 및 $f=1GHz$ 에서 기존의 1단계 근사화 방법^[4]으로 구해진 단순함수형태의 그린함수의 계산결과와 본 논문이 제안한 2단계 근사화 방법으로 구해진 그린함수의 계산 결과를 비교하여 제시하였다. 그림 5(a)와 (b)에서 볼 수 있듯이 비교적 주파수가 낮은 경우에는 기존 1단계 근사화 방법 및 2단계 근사화 방법으로 구한 그린함수 결과들이 비교적 잘 일치함을 알 수 있으나. 그림 5(c)에서 보는 바와 같이 주파수가 높은 경우 기존의 1단계 근사화 방법으로 구한 그린함수 결과들이 ρ 가 작은 영역에서 큰 오차를 가짐을 알 수 있다. 이와 같이 본 논문이 제안한 2단계 근사화 방법이 기존의 1단계 근사화 방법과는 달리 넓은 주파수 영역에서 개선된 결과를 줄 수 있는 이유는 1단계 근사화 방법에서 무시되었던 T_0 이후의 spectral 그린함수의 기여를 고려해 넣을 수 있었기 때문이라고 사료되어진다. 즉 개선된 결과를 주는 주된 요인은 식(8)의 그린함수항 G_{cn} 이며, 이 항은 비교적 k_ρ 가 큰 경우의 spectral 그린함수의 결과(공간영역에서는 비교적 ρ 가 작은 영역에서의 그린함수 결과)에 해당하므로 본 논문에서는 G_{cn} 을 “준정적 복소영상들(quasi-static complex images)”에 의한 공간영역의 그린함수항으로 부르고자 한다. 또한 그림 4에 제시된 2단계 근사화에 의한 그린함수의 결과는 III장 (3)에서 제시된 방법으로 근사화 계수들을 선택하여 구해진 그린함수의 결과이므로, 기존의 1단계 근사화 방법에서 문제점으로 지적되었던 근사화 매개 변수들의 선택에 어려운 점과 매개 변수 선택을 위해 사전에 spectral 그린함수를 조사해야되는 불편한 점들이 본 논문이 제안한 복소영상법에 의해 해소되어졌다고 할 수 있겠다.

결론적으로 본 논문이 제안하는 개선된 복소 영상법을 사용할 경우 위에서 언급된 바와 같이 기존의 복소

영상법이 가지는 문제점들을 해소하면서 넓은 주파수 범위에서 전원점과 관찰점의 위치에 관계없이 기존의 복소영상법으로 구해진 그린함수 결과보다 더 정확한 결과를 줄 수 있는 단순함수 형태의 그린함수 표현식을 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 개구를 통한 PPW 내부로의 EMP의 결합문제, 또는 반사판을 갖는 마이크로스트립 슬롯 안테나 등을 수치 해석하기 위하여 모멘트법(MOM)을 사용할 경우 본 논문에서 제안된 단순함수형태의 그린함수 표현식을 사용함으로써 수치해석시 계산시간의 효율성(computational efficiency)을 높일 수 있을 것으로 사료되어진다.



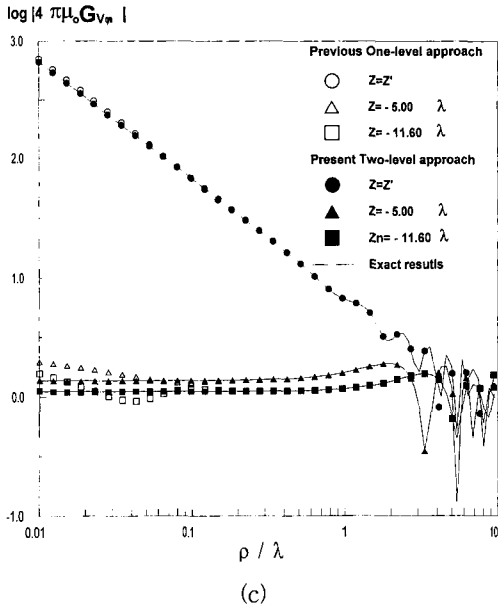


그림 5. 기존의 one-level 근사화 방법과 본 논문에서 제시한 two-level 근사화 방법을 사용하여 구한 그린함수 G_{Vgm} 의 크기

(a) $freq. = 10MHz$ ($T_{01} = 19.12, T_{02} = 4.78, N_1 = 3, N_2 = 3$), (b) $freq. = 500MHz$ ($T_{01} = 4.76, T_{02} = 1.19, N_1 = 3, N_2 = 12$), (c) $freq. = 1GHz$ ($T_{01} = 4.56, T_{02} = 1.14, N_1 = 3, N_2 = 24$)

Fig. 5. Magnitude of Green's function G_{Vgm} obtained by use of the previous method (one-level approximation) and the present method (two-level approximation).

참 고 문 헌

[1] Y. Rahmat-Samii, "Electromagnetic pulse coupling through an aperture into a two-parallel-plate region," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* vol. 20, no. 3, pp. 436-442, August 1978.

[2] K. Katsurahra and K. Itoh, "Theoretical consideration on parallel-plate waveguide modes of a slot antenna with a reflector," *Proceedings of ISAP'92*, pp. 437-440, (Sapporo, Japan, 1992).

[3] P. A. Huber and Y. L. chow, "The 3-D Green's function and the moment method for stripline circuits," *IEEE AP-S Int. Symp. Dig.* pp. 312-315, (Dallas, TX,

Mag, 1990).

[4] J. J. Yang, Y. L. Chow, G. E. Howard, and D. G. Fang, "Complex images of an electric dipole in homogeneous and layered dielectrics between two ground planes," *IEEE Trans. MTT*, vol. 40, no. 3, pp. 595-600, Mar. 1992.

[5] 이 영순, 권 호상, 조 영기, 손 현, "개구를 통한 평행평판 도파관 내부로의 전자파 펄스 결합문제를 위한 단순함수형태의 공간영역 그린함수," *대한 전자공학회 논문지*, 제33권 A편 제9호, pp. 63-71, 1996

[6] M. I. Aksun, "A robust approach for the derivation of closed-form Green's functions," *IEEE Trans. MTT*, vol. 44, no. 5, pp. 651-658, May 1996.

[7] Y. Hua and T. K. Sarkar, "Generalized pencil-of-function method for extracting poles of an EM system from its transient response," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. 37, pp. 229-234, Feb. 1989.

[8] R. W. Hamming, *Numerical methods for scientists and engineers*, Dover, NY, pp. 620-622, 1973.

[9] J. R. Mosig and F. E. Gardiol, *A dynamical radiation model for microstrip structures*, In Hawkes. P. (Ed.), *Advances in electronics and electron physics*, Academic Press, NY, pp. 139-237, 1982.

[10] 이 영순, 이 창원, 조 영기, 손 현, "임의 형태의 개구에 의한 평행평판 도파관으로의 전자기적 결합 문제 해석을 위한 적분방정식 방법," *대한 전자공학회논문지*, 제 32권 A편 12호, pp. 25-35, 1995

 저 자 소 개

李永淳(正會員) 第 32卷 A編 第 12號 參照
 현재 금오공과대학교 전자공학부 교
 수

權鎬祥(正會員) 第 33卷 A編 第 9號 參照
 현재 대우전자 RF 프로젝트팀 근무

趙榮基(正會員) 第 33卷 A編 第 8號 參照
 현재 경북대학교 공과대학 전자전기
 공학부 교수