
3차원 TLM 법에서 그린 흡수층을 이용한 도파관 필터의 해석

김병수* · 전계석**

Analysis of Waveguide Filter Using Green's Absorbing Layer
in three Dimension TLM Method

Byung-Soo Kim* · Kye-Suk Jun**

요약

TLM 법에서 이산 그린함수 흡수경계는 광대역에서 정밀한 수치해석에 사용되어왔다. 그러나 이산 그린함수 흡수경계는 이산 그린함수를 얻는 수치해석이 부가적으로 요구되기 때문에 흡수경계를 적용하는 과정이 복잡하다. 그러므로 흡수경계를 적용하는 과정의 간소화를 위해서 본 논문에서는 새로운 그린 흡수층을 제안한다. 제안된 그린 흡수층은 이산 그린함수의 손실처리 방법을 응용하여 구현하였으며 최적의 흡수 상태를 그린 흡수층의 길이에 대응하는 손실 증가율과 감쇠상수의 관계로 얻을 수 있었다. 또한 최적의 흡수상태가 되는 그린 흡수층을 적용하여 도파관 대역통과필터를 해석하였다. 그 결과, 기존의 그린함수 흡수경계와 제안된 그린 흡수층을 적용한 해석 결과가 정확히 일치하였다

ABSTRACT

In TLM method, Discrete Green's function ABC have been used when improved the exactness of analyzing in wide frequency band. But this technology has a complicated process to apply absorbing boundary, which means it needs additional numerical analyzing process to obtain discrete Green's function data. so, In this paper, we propose new Green's absorbing layer for simple process to apply absorbing boundary. newly proposed Green's absorbing layer is produced by applying of loss operation, loading discrete Green's function with attenuation. A state of optimum absorbing would be obtained by relation between increasing rate of loss, attenuation constant and length of green's absorbing layer. and then Analysis of waveguide BPF is carried out using Green's absorbing layer within state of optimum absorbing, then this result is in corrective agreement with the result applying traditional discrete Green's function ABC.

*신성대학
접수일자 : 2001. 8. 1

** 경희대학교

1. 서론

마이크로파나 밀리미터파 영역에서 초고주파 통신 소자 내의 전자장의 산란과 방사를 정확히 해석한다는 것은 매우 난해하고 어려운 문제이다. 그러나 초고주파 통신소자의 개발을 위하여 정밀한 해석의 중요성은 점차로 증가하고 있는 실정이다. 따라서 정확한 해석을 위해 변분법(Variational Method), 유한요소법(FEM; Finite Element Method), 모멘트법(MOM; Method Of Moment), 유한차분법(FDM; Finite Defferance Method) 같은 컴퓨터를 이용한 여러 가지 수치 해석 방법이 1970 년대부터 활발히 연구되어 왔으며, 최근에는 TLM (Transmission Line Matrix), FDTD(Finite Difference Time Domain) 와 같은 시간 영역 해석법이 마이크로파 또는 밀리미터파 소자의 완전한 필드 특성을 가지적으로 보여주고 주파수 특성까지 해석이 가능하므로 편리한 수치해석법으로 각광을 받고 있다. 그러나 국내에서는 시간영역 해석법으로 FDTD 법에 대한 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있지만 TLM 법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. TLM 해석법은 1971년 영국의 Johns 과 Beurle Akhtarzad에^[1]의해 Huygen의 전파원리를 바탕으로 2차원 전송선로를 모델링한 해석 방법을 소개하였으며 그 이후 Johns 이 여러 가지 3차원 구조의 전송선로를 모델링한 해석 방법을 제안하면서부터 Hofer W.J. 등 다른 많은 연구자들에 의해 지속적인 개발이 이루어지고 있다. 또한 그 응용분야는 MMIC, 안테나, EMI/EMC, RCS(Radar Cross Section) 등에 광범위하게 활용되고 있다^[2]. 현재는 능동소자를 TLM 법을 이용하여 수치 해석하려는 연구와 FDTD 법에서 소개된 완전 흡수층(PML)을 TLM 법에 접목시키거나 새롭게 구현하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

본 논문에서는 기존의 정합 흡수경계와 이산 그린 함수 흡수경계의 처리과정을 소개하고 이를 응용한 새로운 그린 흡수층의 구현과정을 논의한다. 끝으로, 그린 흡수층을 적용한 도파관 필터의 수치해석 결과를 기존방법과 비교 검토하고 최적의 흡수상태가 되는 그린 흡수층의 파라미터 설정에 대해서 다루고자 한다.

II. 3차원 TLM 알고리즘

3차원 TLM 법은 Akhtarzad와 Johns에 의해 2차원에서 취급한 2종류의 병렬노드(Shunt Node)와 직렬노드(Series Node) 구조를 세 좌표 방향에 직교하도록 결합하여 그림1과 같은 3차원 확장노드^[3](Expanded Node) 셀 구조가 처음으로 사용되었다.

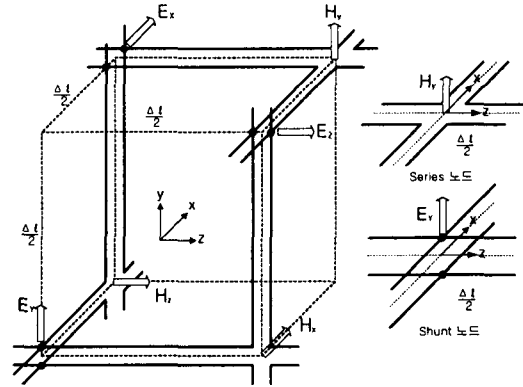


그림 1. 3차원 확장노드의 구조

그 이후, Peter Johns에 의해 매질에서 전파속도와 주파수 분산오차를 개선하기 위해 확장노드 셀을 집약시킨 형태로 그림2와 같이 대칭압축노드(Symmetrical Condensed Node, SCN)^[3,4] 셀 구조가 가장 광범위하게 사용되고 있다. SCN 셀 구조는 동일공간 Δl 과 시간 Δt 상에 동일한 특성 임피던스로 집약되었기 때문에 비균질 매질 및 주파수 분산매질에서도 명확한 해석이 가능하다. SCN 셀 구조는 그림 3 과 같이 12개의 전송선로로 구성되고 12개의 전압 임펄스($V_1 \sim V_{12}$)로 6개의 전자기장 성분을 표현하고 있으며 유전체나 마그네틱 매질을 표현할 때는 유전체 스테르브, 마그네틱 스테르브, 손실 스테르브를 추가하여 SCN 셀을 구성하며 추가된 스테르브 즉, 추가된 전송선로의 전압 임펄스($V_{13} \sim V_{18}$)에 의해 매질 특성을 표현한다.

TLM 법에서는 3차원 공간을 TLM 망 또는 TLM 메쉬로 표현하며 이 TLM 망은 SCN 셀을 3차원 배열로 나열하고 연결시켜서 구성한다. 또한 경계영역은 셀과 셀의 연결부분인 $\Delta l/2$ 지점에 위치한다. 자유공간에서 전자파의 산란과 진행과정에 해당되는 TLM 수치해석 알고리즘은 식(1)과 같이 SCN 셀 내부로 전압 임펄스의 입사에 의한 반사과정인 산란행렬 S 와 셀에서 인접 셀로 전압 임펄스의 연결과정으로 구성된다.

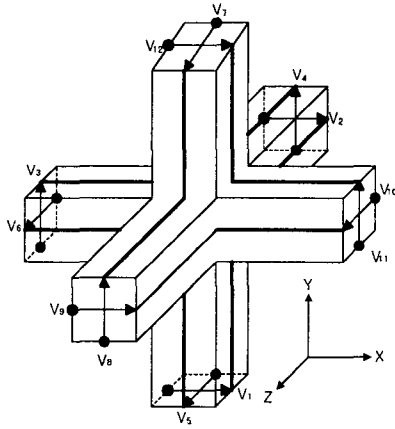


그림 2. 스텐브가 없는 SCN 셀의 구조

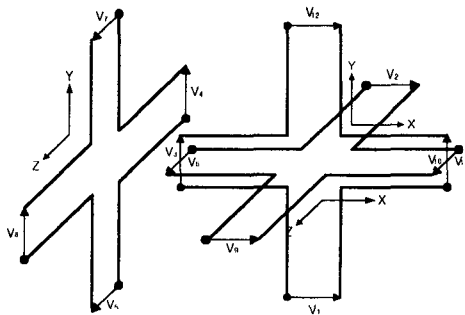


그림 3. SCN 셀을 구성하는 전송선로

$$V_{k+1}^r = S V_k^i \quad (1)$$

식 (1) 에서 V_{k+1}^r 는 시간단계 k+1에서 반사될 전압 임펄스이고 V_k^i 는 시간단계 k 에서 입사된 전압 임펄스이다. 산란행렬 S 는 TLM 임펄스 산란행렬이라 하며 SCN 셀 에서 에너지와 전하 보존법칙에 이용하여 입사된 임펄스와 반사된 임펄스의 관계에 의해 유도^[5,6]되며 임의의 시간 $k \Delta t$ 에서 공간위치 (x, y, z) 의 전자장 성분은 셀을 중심으로 입사 또는 반사되는 전압 임펄스에 의해 식 (2) 와 같은 관계에 의해 계산된다.

$$E_x(i, j, k) = \frac{2(V_1^i + V_2^i + V_9^i + V_{12}^i + Y_x^i V_{13}^i)}{(4 + Y_x) \Delta \ell}$$

$$H_x(i, j, k) = \frac{2(+V_4^i - V_5^i + V_7^i - V_8^i - V_{16}^i)}{Z_0(4 + Z_x) \Delta \ell}$$

$$H_y(i, j, k) = \frac{2(-V_2^i + V_6^i + V_9^i - V_{10}^i - V_{17}^i)}{Z_0(4 + Z_y) \Delta \ell}$$

$$E_y(i, j, k) = \frac{2(V_3^i + V_4^i + V_8^i + V_{11}^i + Y_y^i V_{14}^i)}{(4 + Y_y) \Delta \ell}$$

$$E_z(i, j, k) = \frac{2(V_5^i + V_6^i + V_7^i + V_{10}^i + Y_z^i V_{15}^i)}{(4 + Y_z) \Delta \ell}$$

$$H_z(i, j, k) = \frac{2(-V_1^i - V_3^i + V_{11}^i - V_{12}^i - V_{18}^i)}{Z_0(4 + Z_z) \Delta \ell} \quad (2)$$

공간위치 (x, y, z) 점에서 입사되거나 또는 반사된 전압 임펄스에 의해 시간단계 별로 전자장 성분이 모두 계산되어 전자파의 진행과 산란이 가시화 할 수 있게 된다. 시간영역에서 계산된 전자장 성분은 이산 푸리에 변환을 수행하여 주파수 영역에서 특성^[7]을 해석하며 전기장 성분 E_K 을 이산 푸리에 변환을 하는 경우, 주파수 스펙트럼의 실수부와 허수부는 식 (3)과 같이 주어진다.

$$\text{Real} [E(f)] = \sum_{k=1}^N E_k \text{Cos} (2 \pi k f \Delta t)$$

$$\text{Imag} [E(f)] = \sum_{k=1}^N E_k \text{Sin} (2 \pi k f \Delta t) \quad (3)$$

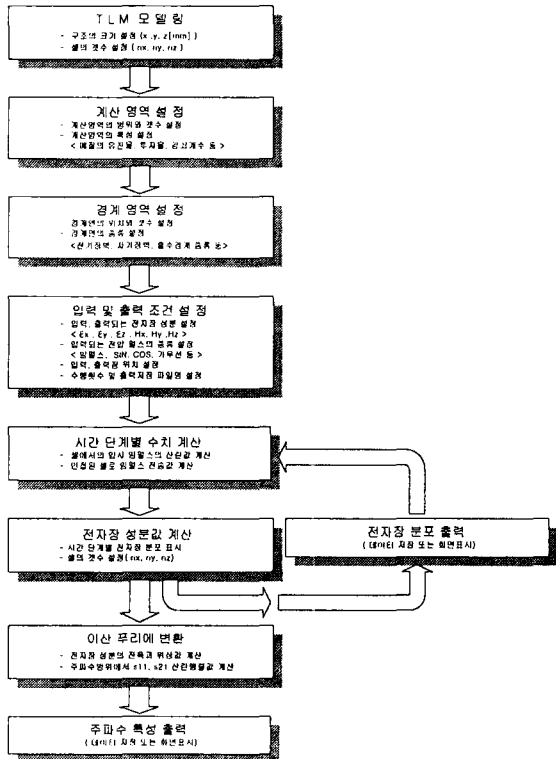


그림 4. TLM 수치해석 프로그램의 순서도

그러므로 TLM 수치해석 알고리즘은 임의의 공간 위치 (x, y, z) 점에서의 시간단계별 필드의 형태와 임의의 주파수에서 필드의 특성이 동시에 확인이 가능하다. 본 논문에서 사용한 TLM 수치해석의 전체적인 프로그래밍 과정을 순서도로 표현하면 그림 4 와 같으며 계산영역의 설정, 경계영역의 설정, 입출력 조건 등의 설정은 확장자가 .def 인 설정 파일에서 일괄적으로 받아들여 수행하도록 하였다. 또한 전자장 분포에 대한 3차원 그래픽 처리를 위한 작업은 미완성인 상태이며 전자장 분포에 대한 데이터를 파일로 저장하도록 하였다.

III. 흡수 경계 조건

컴퓨터의 제한된 메모리로 인해 모델링하는 통신소자의 크기와 계산량은 제한되어 진다. 따라서 경계조건을 설정이 필요하게 된다. TLM 법에서 경계조건의 설정방법으로 전기장벽은 개방회로로 자기장벽은 단락회로로 표현되며 수치해석 과정에서는 전기장벽은 -1 이고 자기장벽은 1 인 반사계수로 수행된다.

3-1 정합 흡수경계

정합 흡수경계는 전송선로와 도파관 측정에 있어서 부하를 정합시키는 원리를 이용하여 전압 임펄스가 완전 흡수되어 어떠한 반사도 없도록 유지하기 위해 그림 5. 와 같이 TLM 망의 종단을 자유공간의 고유임피던스로 연결하여 정합한다. 그러므로 TLM 망의 내부 임피던스와 자유공간의 고유 임피던스 Z_0 로 정규화하여 식(4) 와 같이 반사계수를 계산하여 정합 흡수경계 조건을 설정한다. 식 (4) 에서 ϵ_{eff} 는 전송선로의 유효 유전율이다

$$\rho(\text{반사계수}) = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{eff}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

3-2 이산 그린함수 흡수경계

고전이론인 그린함수 $G(\vec{r}, t | \vec{r}', t')$ 는 식 (5)와 같이 점 전원 $\delta(\vec{r} - \vec{r}')\delta(t - t')$ 에 대한 미분방정식의 해이므로 그린함수를 점 전원에 의해 여기된 전자파 해라 한다. 식(5) 에서 점 전원의 위치는 $r = r'$ 이고 시간은 $t = t'$ 이다.

$$\left(\nabla^2 - \mu\epsilon \frac{\partial}{\partial t^2}\right)G(\vec{r}, t | \vec{r}', t') = \delta(\vec{r} - \vec{r}')\delta(t - t') \quad (5)$$

TLM 망에서 점 전원은 단위 전압 임펄스에 해당된다. 즉, 점 전원의 위치 r 은 3차원 직각좌표 x, y, z 이고 시간 t 는 $k \Delta t$ 인 시간단계 k 값이라 하면 점 전원은 입력된 전압 임펄스 $V^i(r, k)$ 표현된다. 그러므로 $k=0$ 이고 $r=(x, y, z)$ 에서 단위 전압 임펄스가 여기되면 시간단계 $k = k'$ 이고 위치 $r'=(i', j', k')$ 에서 임펄스 응답 $V^r(r', k')$ 이 이산 그린함수 $G(r', k')$ 가 된다. 그린함수를 알면 일반적인 소스에 대한 필드 해는 식 (6)과 같이 그린함수의 전원 분포영역(체적 v')에 대한 적분으로 얻는다. 식(6)에서 $K(\vec{r}, t')$ 는 일반적인 입력소스이고 $\phi(\vec{r}, t)$ 는 공간의 위치가 \vec{r} 이고 시간 t 에서 얻어진 필드함수이다.

$$\phi(\vec{r}, t) = \int_{v'} G(\vec{r}, t | \vec{r}', t') K(\vec{r}', t') dv' dt' \quad (6)$$

연속함수가 이산함수로 변환할 때 적분식은 컨벌루션 형태가 되며 식(6)을 임펄스 응답에 대한 이산 그린함수 $G(r', k')$ 로 표현하면 임펄스 출력함수 $V^r(r, k) = G(r', k - k') * V^i(r', k')$ 형태가 된다. 일반적으로 시간 $t = k \Delta t$ 이고 r 인 위치에서 임펄스 응답함수는 입사 임펄스와 이산 그린함수의 컨벌루션에 의해 식 (7)과 같이 얻어진다.

$$V^r(r, k) = \sum_{k'=0}^k G(r', k') V^i(r', k - k') \quad (7)$$

그린함수 경계면으로 입사되는 임펄스 $V^i(r, k')$ 를 시간단계 별로 식(7)을 수행하면 경계면에서 반사되는 임펄스 $V^r(r, k)$ 을 계산하는 이산 그린함수 경계가 수행된다. 이러한 이산 그린함수 경계는 앞에서 긴 도파관을 모델링한 TLM 망이 경계면 뒤에 추가된 효과와 같게 된다. 그러므로 충분히 긴 도파관 길이 대한 이산 그린함수 $G(r', k')$ 를 획득하고 그린함수 경계를 수행하면 충분한 크기의 공간상으로 임펄스가 진행하는 경계 역할을 수행한다.

IV. 새로운 흡수층의 구조

무한한 공간을 TLM 망으로 모델링 할 수 없으므로 유한한 크기를 갖는 TLM 망의 종단 점에서 고주파 성분이 반사된다. 이러한 반사가 생성되지 않도록 그린함수에 점차적으로 손실을 증가시켜 반사성분을 제거하여 사용할 경우, 원래의 그린함수를 사용했을 때 보다 더 정확한 결과를 얻었다^[8]. 이와 같이 반사성분을 제거한다는 것은 마치 무한공간에서 얻어진 그린함

수처럼 동작하는 것이다. 손실은 임펄스 진행방향에서 반사가 1% 이내로 무시되도록 유지하면서 점차 증가 되도록 설정해야 하며 임펄스 전압파의 진행방향에 따라 손실을 아래의 식(8)과 같이 매우 천천히 증가시켜야 한다. 식(8)에서 α_1 은 반복횟수 $k=1$ 일 때 감쇠상수이고 α_2 는 반복횟수 $k = N$ 번째의 감쇠상수이다.

$$G'(k) = G(k) \times \exp\left(\sum_{k'=1}^k \alpha(k')\right)$$

$$\alpha(k') = \alpha_1 \times \exp\left(\frac{k'-1}{N} \ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)\right) \quad (8)$$

유한한 크기를 갖는 TLM 망에서 얻어진 그린함수를 마치 무한 공간에서의 얻어진 그린함수로 사용할 수 있으므로 무한한 공간으로 전파가 진행하는 흡수경계로 사용할 수 있다는 장점에도 불구하고 이산 그린함수를 획득하는 수치해석 과정이 수행된 이후에 이산 그린함수 경계영역을 처리하는 과정이 수행되므로 2번의 수치해석 과정이 필요하다. 그러므로 이러한 그린함수 경계를 위한 복잡한 처리과정을 일괄적으로 처리하기 위해서는 반복횟수에 비례하여 임펄스의 진행방향에 따라 손실이 증가하는 N 개의 손실층을 그림 5와 같이 생각할 수 있다.

그러나, 이산 그린함수에 손실을 점차적으로 증가시킨 경우, 손실층의 개수는 5 배 정도로 줄어들며 손실층을 통과할 때 마다 손실이 누적되기 때문에 손실층

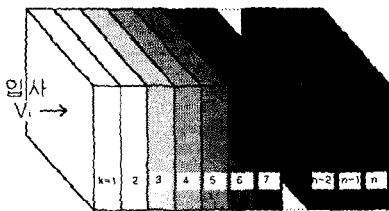


그림 5. N 개의 손실층 배열 형태

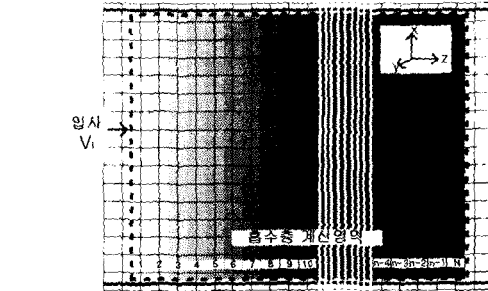


그림 6. TLM 망에서의 흡수층의 구성

의 수는 지수적으로 줄어들 가능성이 갖게 된다. 본 논문에서는 어떠한 추가적인 경계 수행이 필요 없도록 개별적인 손실층을 구현하지 않았으며 단지, 손실층을 입사방향에 수직인 SCN 셀 구조의 평면으로 가정하고 손실의 증가가 연속적으로 수행할 수 있는 방법으로 그림 6과 같이 흡수영역으로 설정할 수 있는 새로운 그린 흡수층을 구현하였다. 흡수층에서 손실의 증가는 식(8)을 응용하여 손실 증가율 σ 과 최종 감쇠상수 α_N 에 관련된 관계식으로 식(9)와 같이 유도하였다.

$$\alpha(k\Delta z) = \sigma \times \left[\exp\left\{\frac{k}{N} \ln\left(\frac{\alpha_N}{\sigma}\right)\right\} - 1 \right] \quad (9)$$

이 흡수영역은 TLM 수치연산을 위한 계산영역의 새로운 종류이며 TLM 수치해석 프로그램 내에서 흡수영역인 경우에 한하여 임펄스의 진행방향에 따라 가변적인 손실을 추가되도록 하여 흡수 역할이 수행되도록 하였다.

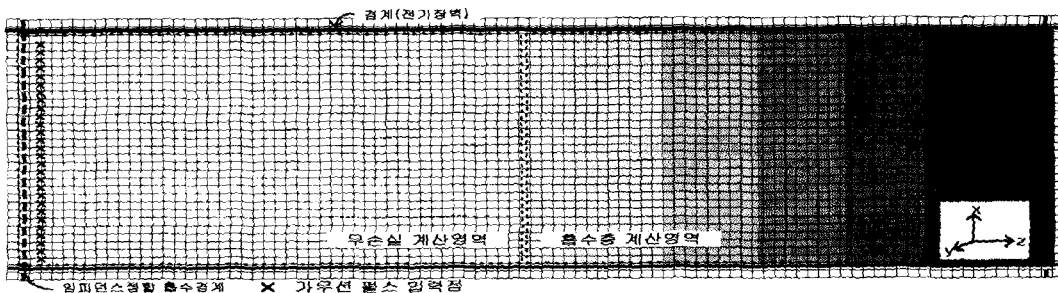


그림 7. 도파관 내부에 흡수층을 설정한 TLM 망의 평면도

V. 실험 및 고찰

5-1 그린 흡수층의 성능

WR90 규격의 도파관 내부에 흡수체가 삽입하였다고 가정하면 이 흡수체를 그린 흡수층으로 설정하고 흡수과정을 시간영역에서 확인하기 위해서 도파관을 그림 7 과 같이 34×17×100 개의 셀로 구성된 TLM 망으로 모델링하였다.

그림 7 에서 z축 진행방향으로 1Δℓ 부터 50 Δℓ 까지는 무손실 도파관 영역으로 설정하고 51Δℓ 부터 100 Δℓ 까지는 그린 흡수층으로 설정하였다. 입력소스는 Ey 성분만으로 구성된 가우션 펄스를 z = 3 인 xy 평면에 인가시켰다. 입력된 가우션 펄스의 시간영역과 주파수 영역 특성을 그림 8 에 보였으며 식 (10) 으로 표현한다.

$$g(n\Delta t) = \exp\left[-\frac{(n\Delta t - 100\Delta t)^2}{5\Delta t^2}\right] \quad (10)$$

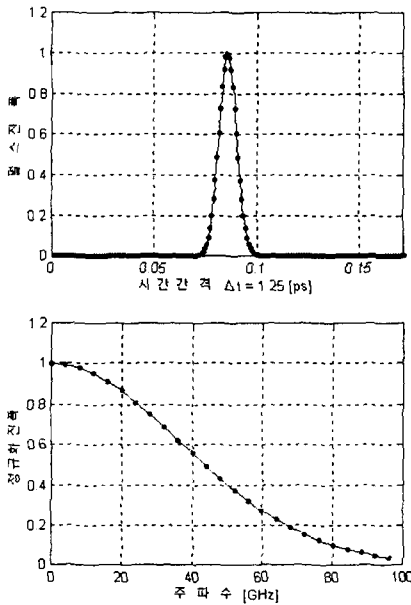


그림 8. 입력된 가우션 펄스의 특성

가우션 펄스를 인가한 후, 시간간격 k = 160, 200, 240, 280, 320 일 때, 각각 y = 8 인 xz 평면에서 전장 Ey 성분의 분포형태를 그림 9 에 보였다. 시간간격 k=200 에서 부터 가우션 펄스가 흡수층으로 입사가 시

작되고 가우션 펄스가 흡수층으로 진행함에 따라 천천히 흡수되고 있음을 시각적으로 알 수 있다. 그러므로 그린 흡수층이 정상적으로 흡수 역할을 수행하고 있다.

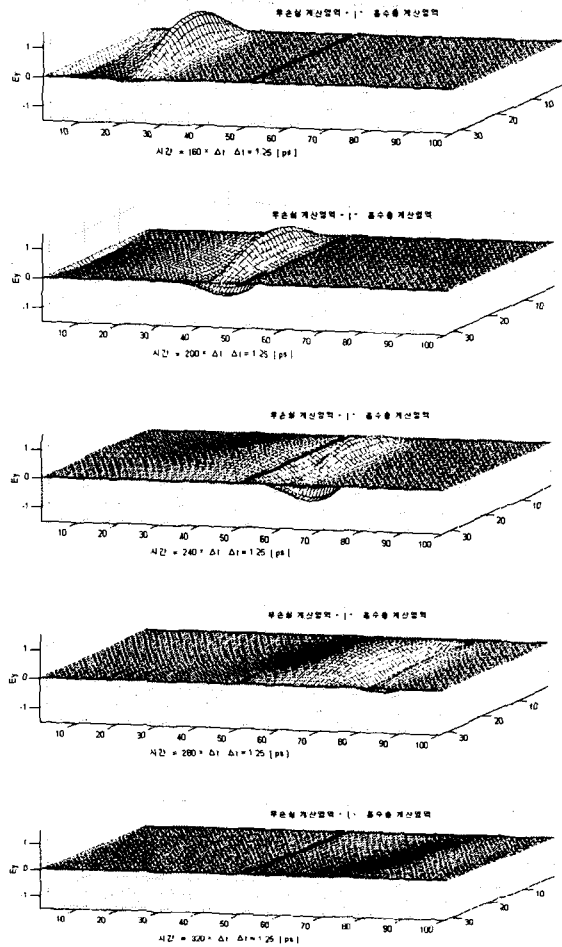


그림 9. 그린 흡수층에서 가우션 펄스의 흡수과정

5-2 그린 흡수층에서 손실 증가율의 설정

그린 흡수층이 최적의 흡수 상태가 되도록 설정하기 위해서 우선적으로 그린 흡수층의 길이 변화에 대응하여 손실 증가율과 최종 감쇠상수를 결정해야만 한다. 즉, 흡수층으로 입사한 펄스가 흡수층의 종단에서 투과하는 펄스가 없도록 손실 증가율과 최종 감쇠상수가 설정되어야 한다. 흡수층에서 손실의 증가는 손실 증가율 σ 과 최종 감쇠상수 α_N 로 식 (9)를 사용하여 손실 증가율에 의해 흡수층 길이에 따라 입사한 펄스

의 진폭 변화를 그림 10 에 보였다. 그림 10 의 결과는 흡수층의 너비를 $50\Delta z$ 로, 최종 감쇠상수 α_N 를 0.3 로 설정하고 손실 증가율 σ 를 각각 0.02, 0.01, 0.005, 0.002, 0.001 로 설정할 때, 흡수층에서 진행되는 펄스의 진폭과 흡수층 내부에 설정된 감쇠비를 보여준다.

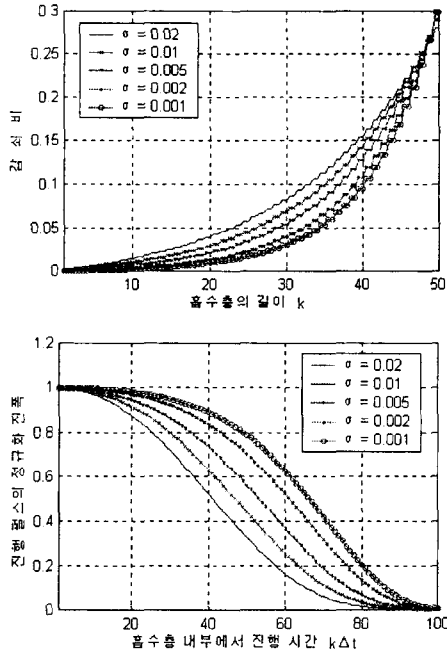


그림 10. 흡수층의 감쇠비 변화에 따른 진행파의 진폭 감소를 비교

그림 10 에서 손실비의 누적량은 손실증가율이 0.001일 때 가장 작으며 흡수층 내부에서 진행파가 완전 소멸되는 것을 볼 수 있다. 그러므로 현재의 상태에서는 손실증가율이 0.001일 때 가장 적합하다. 그러나 최적의 결과를 얻기 위해서는 손실비의 누적량을 감소시켜야 하며 이를 위해서는 최종 감쇠상수를 줄여야 한다. 최종 감쇠상수가 0.3 이하로 설정할 경우에 손실증가율이 0.001인 흡수층에서 진행파가 완전 소멸되지 못할 것이므로 가장 적합한 손실 증가율은 0.005가 적당하다. 손실 증가율 σ 를 0.005 로 설정하고 흡수층 길이에 따라 입사한 펄스의 진폭 변화와 흡수층 내부에 설정된 감쇠비의 변화를 그림 11 에 보였다.

그림 11 에서 흡수층 내부에서 진행파가 완전 소멸되면서 손실비의 누적량이 가장 작은 것은 최종 감쇠상수가 0.2가 적합함을 알 수 있다. 그러므로 흡수층의

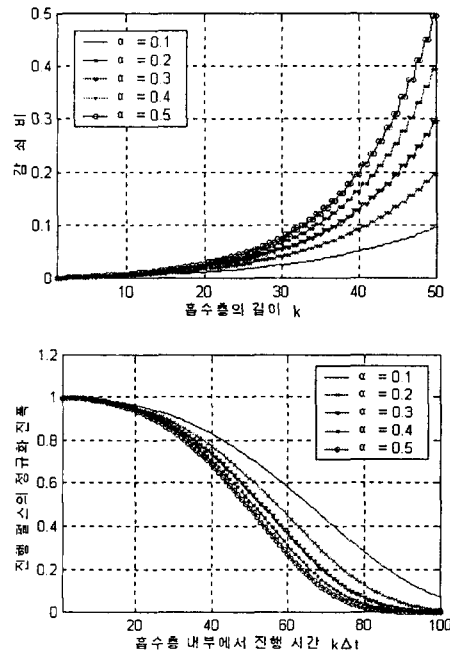


그림 11. 흡수층의 감쇠상수 설정에 따른 진행파의 진폭 감소를 비교

너비가 $50\Delta z$ 일 경우에 최적의 손실증가율 0.005 이고 최종 감쇠상수는 0.2가 최적임을 알 수 있다. 그 외에 흡수층의 길이를 변화시키면서 최적의 손실 증가율과 최종 감쇠상수를 검토하고 이 결과물에 의해서 최적 흡수상태가 되는 조건으로 그린 흡수층의 너비와 관련된 식 (11) 을 유도할 수 있었다.

$$\alpha(k\Delta z) = \frac{1}{4N} \times [\exp\left\{\frac{k}{N} \ln(4N\alpha_N)\right\} - 1]$$

$$\alpha_N = 2.5 \times \ln(N) / N, k = 1 \sim N \quad (11)$$

5-3 그린 흡수층을 적용한 단일 금속삽입 필터 해석

그린 흡수층의 성능을 확인하기 위해서 최적의 흡수상태로 손실증가율과 최종 감쇠상수를 설정하고 도파관 대역통과 필터를 해석하였다. 해석에 사용된 도파관 필터는 도체판의 두께 $t = 0.7 \text{ mm}$ 인 금속삽입 대역통과 필터이며 필터의 규격을 표 1 에 보였으며 필터의 평면도를 그림 12 에 보였다.

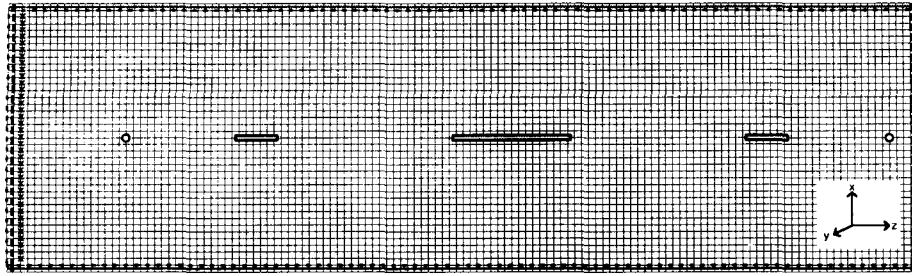


그림 12. 단일 금속삽입 필터를 모델링한 TLM 망의 평면도

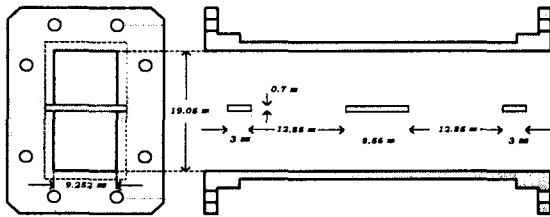


그림 12. 단일 금속삽입 필터의 평면도

표 1. 금속삽입 필터의 규격과 TLM 셀 크기의 비교

필터의 규격	TLM 셀 크기		오 차
도파관 폭	$a = 19.05 \text{ mm}$	$37\Delta x$ 19.018 mm	0.32 mm
필터 길이	40.24 mm	$79\Delta z$ 40.606 mm	0.366 mm
금속 판 의 길이	$\ell_{1.5} = 3.0 \text{ mm}$	$6\Delta z$ 3.084 mm	0.084 mm
	$\ell_3 = 8.56 \text{ mm}$	$17\Delta z$ 8.25 mm	0.178 mm
공진기 의 길이	$\ell_{2.4} = 12.84 \text{ mm}$	$25\Delta z$ 12.85 mm	0.01 mm
금속 두께	$t = 0.7 \text{ mm}$	$1\Delta x$ 0.514 mm	0.186 mm

또한 금속삽입 필터^[9]의 특성 해석을 위해서 그림 12 와 같이 TLM 망으로 모델링하였으며 $z=3$ 인 xy 평면에 식(10)의 가우션 펄스를 인가한 후, $(x=20, y=10, z=18)$, $(x=20, y=10, z=127)$ 인 점에서 시간단계 $K=12000$ 번 까지 전장 E_y 성분을 계산하고 주파수 분석을 위해 이산 푸리에 변환을 수행하여 10 GHz 부터 15 GHz 까지의 주파수 영역에서 금속삽입 필터의 통과대역 삽입손실의 주파수 특성을 해석할 수 있었다. 그린 흡수층은 가우션 펄스의 진행방향인 $\pm z$ 방향으로 $50 \Delta z$ 의 길이로 단일 금속삽입 필터의 입력단과 출력단에 흡수영역을 설정하여 사용하였으며 그린 흡수층의 손실 증가율 $\sigma = 0.005$, 최종 감쇠상수 $\alpha N = 0.2$ 로 설정하였다. 그린 흡수층을 적용한 금속삽입

필터의 해석결과는 이산 그린함수 흡수경계와 비교하여 그림 13 에 보였으며 정확히 일치하는 특성을 확인할 수 있었다.

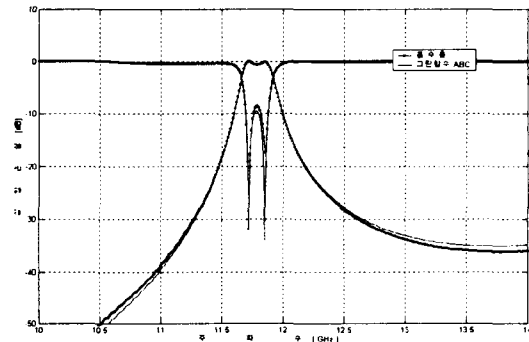


그림 13. 금속삽입 필터의 주파수 특성의 비교

또한 HP사의 8510C Vector Network Analyzer를 사용한 측정결과를 그림 14 에 보였으며 해석 결과와 측정치를 비교할 때 중심주파수를 제외하고 통과대역 특성이 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 표 1 에서 와 같이 TLM 모델링 과정에서 셀 크기 설정에 의한 절단 오차에 의한 것이라 여겨진다. 이러한 절단오차를 검토하기 위해서 표 1 의 TLM 망에서 설정된 필터의 규격을 사용하여 Mode Matching 법으로 필터를 해석한 후, 필터의 통과대역 주파수 특성을 그림 15 에 보였다. 또한 기존의 매칭 흡수경계와 이산 그린함수 흡수경계 그리고 그린 흡수층을 적용한 금속삽입 필터의 해석결과를 모두 비교하였다. 모든 해석결과와의 중심주파수가 일치하고 있으므로 측정치와 해석결과와의 오차는 셀 크기에 의해 설정된 절단 오차임을 확인할 수 있다.

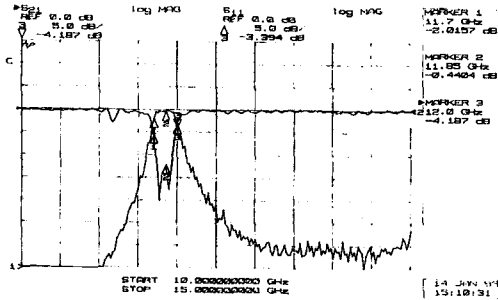


그림 14. 금속삽입 필터의 주파수 특성 측정 결과

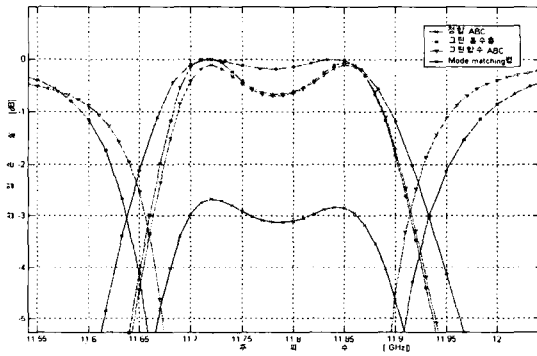


그림 15. 필터의 통과대역 분석 특성 비교

VI. 결론

최근 각광받는 시간영역 해석법으로 FDTD 법에 대한 많은 연구가 활발하게 이루어지고 있지만 TLM 법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 3차원 TLM 해석법을 소개하고 TLM 해석법에 적용되는 기존의 매칭 경계와 이산 그린함수 흡수경계를 자세히 다루었다. 특히, 흡수경계를 적용하는 과정의 간소화를 위해서 그린함수에 손실을 처리하는 과정을 응용하여 새로운 그린 흡수층을 제안하였다. 3차원 SCN 셀 구조의 TLM 알고리즘을 프로그램으로 완성하고 완성된 프로그램으로 그린 흡수층의 정상적인 흡수과정을 시각적으로 확인하였다. 또한 그린 흡수층이 너비 변화에 따라 최적의 흡수상태가 되는 손실 증가율과 감쇠상수의 관계식을 얻었으며 이러한 최적상태의 그린 흡수층을 적용하여 금속삽입 필터의 대역통과 특성을 해석한 결과, 기존의 그린함수 흡수경계와 그린 흡수층을 적용한 금속삽입 필터의 해석결과가 정확히 일치하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 흡수층이 TLM 수치 해석법에서 유용하게 사용될 것을 기대한다.

참고문헌

- [1] P.B Johns and R.I. BEURLE. "Numerical solution of 2-dimensional scattering problem using a transmission line matrix" Proc. Inst. Elec. Eng. vol. 118, no. 9, pp 1203 - 1208, Sept. 1971
- [2] F.J.German, G.K.Gothard, L.S.Riggs, and P.M. Goggans, "The Calculations of Radar Cross Section Using the TLM Method", Int. Journal of Numerical Modelling, Vol 2, No. 4, Dec. 1989, pp 267-278
- [3] W. J. R. Hoefler, "The transmission-line matrix method Theory and applications." IEEETrans. Microwave Theory Tech. vol. MTT-33, pp. 882-893, Oct 1985
- [4] W. J. R. Hoefler, "The transmission line matrix(TLM) method." in Numerical Techniques for Microwave and Millimeter Wave Passive Structures. T. Itoh, Ed. New York : Wiley, 1989
- [5] W. J. R. Hoefler, "Linear and nonlinear field modeling in the time domain with the transmission line matrix(TLM) method." Alta Frequenza. vol. I.VIII.Aug 1989
- [6] Christos Christopoulos, " The transmission line modeling method" Univ. of Nottingham IEEE press, pp1-105. Institute of Electronics Engineering ins. 1995
- [7] J.Uher and W.J.R.Hoefler, "Computation of Microwave S-Parameters with the SC 3D-TLM Method", Microwave and Optical Technology Letter, Vol. 3, No.12, Dec. 1990, pp 411-414
- [8] Esvarappa, George I. Costache, W.J.Hoffer, "Transmission Line Matrix Modeling of Dispersive Wide Band Absorbing Boundarie With Time Domain Diakoptics for S Parameter Extraction", IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol 38. no. 4, April 1990, pp. 379 - 385,

- [9] 통신시스템연구조합, " WAVEGUIDE 및 FILTER 제조기술 개발", 과학기술처, 2차년도 최종보고서, 1995년, 9장, pp 183-230



김병수(Byung-soo Kim)

1995년 3월 : 경희대학교 전자공학과 박사과정
1998년~현재 신성대학 정보통신과 전임강사
관심 분야 : 전자파 해석, 전파전파 특성, 고주파 회로설계



전계석(Kye-Suk Jun)

1983. 8 : 연세대학교 전자공학과 박사
1988. 1~1991.12 : 경희대학교 학생처장
1979. 3~현재 : 경희대학교 전자정보학부 정교수
1998.12 ~2000.12 : 경희대학교 공과대학장
2000. 1~2000. 12 : 한국통신학회 부회장
2001. 1~현재 : 한국통신학회 수석 부회장
관심분야 : 위상배열 안테나, 이동통신, NDT