

論文99-36T-6-9

# 대칭압축 TLM 노드를 이용한 단방향 핀라인의 S-파라미터 추출 (S-Parameter Extraction of Unilateral Finline Using the Symmetrical Condensed TLM Node)

金 泰 源 \*

(Tae-Won Kim)

## 요 약

이전에 여러 가지 주파수영역 해석법에 의해 핀라인의 주파수 종속 특성이 해석되었다. 그러나 본 논문에서 제시된 시간영역 TLM법은 핀라인의 주파수영역 해를 얻기 위한 또 다른 독립된 해석법이다. 이와 같은 알고리즘을 이용하여 해석된 구조는 WR-62 도파관에 내재된 단방향 핀라인이며 Huygen의 산란 모델 특성에 근거한 대칭압축노드가 사용되었다. TLM 결과로부터 시간영역 데이터를 푸리에 변환함에 의해 단방향 핀라인의 주파수 종속 산란 파라미터가 계산되었다. 수치해석 결과는 다른 다른 논문과 잘 일치하며 따라서 제안된 방법의 타당성과 유용성을 입증하였다.

## Abstract

The frequency-dependent characteristics of the finline have previously been analyzed using several frequency domain approaches. But the time domain TLM method presented in this paper is another independent approaches for obtaining frequency domain results for finline. The structure analysed with this algorithm is unilateral finline in WR-62 waveguide enclosures and the symmetrical condensed node based on the properties of Huygen's scattering model is used. From the TLM results, the frequency-dependent scattering parameters of a unilateral finline have been calculated by Fourier transform of the time domain data. The numerical results are in good agreements with other paper, thus demonstrating the validity and usefulness of the proposed method.

## I. 서 론

급격하게 발달하고 있는 마이크로웨이브 관련 기술은 보다 높은 주파수 대역의 이용에 따라 더욱 정밀한 회로와 성분을 필요로 하며 이에 따른 시스템 성능의 특성을 개선시키거나 제조 이전에 구조에 대한 명확한 특성을 찾아내기 위한 수치해석 방법을 필요로 한다.

현재 마이크로웨이브 분야에서 전자계 문제를 해석

하기 위한 여러 종류의 수치해석법이 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 대부분의 수치해석법은 주파수영역 해석법으로 신속하고 유효한 컴퓨터 프로그램을 제공하는데 있어서 의심할 여지가 없지만 주파수 영역에서 동작하기 때문에 해석 구조에 대한 시간 종속 특성을 직접적으로 설명할 수 없으며 복잡하고 불규칙적인 단면을 갖는 구조에 대해서는 적용에 한계를 갖는 단점이 있다. 따라서 이와 같은 환경하에서는 TLM법과 같은 시간영역 해석법이 마이크로웨이브나 밀리미터웨이브 구조의 완전한 필드 특성을 설명하기 위한 매우 적절한 수치해석법으로 사용될 수 있다.

TLM법에 있어 P. B. Jones가 처음으로 제안한 대

\* 正會員, 尙志大學校併設專門大學 電子科

(Dept. of Electronics, Sangji Junior College)

接受日字1999年3月8日, 수정완료일:1999年6月4日

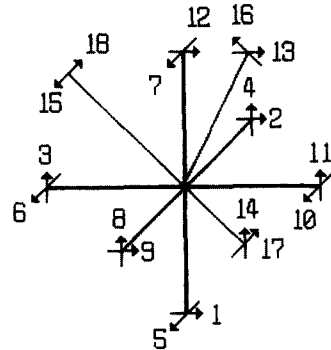
칭압축노드<sup>[1]</sup>는 공간상의 동일 지점에서 전계와 자계를 나타낼 수 있고 유전체와 도체의 접속에 따른 두 매질 사이의 경계가 일치할 뿐만 아니라 계산의 단순성을 제공하는 이점이 있다. 이것은 이전의 TLM법에서 사용되던 expanded 노드<sup>[2]</sup>보다 더욱 효율적인 요소를 갖고 있다. 또한 핀라인은 도파관에 플라나 형태의 도체판이 삽입된 형태의 이중적인 구조로 인한 해석의 난해성으로 인해 스펙트럴 영역법과 modal 해석을 혼합한 해석이 대부분이다. Meier<sup>[3]</sup>와 Saad<sup>[4]</sup>에 의해 해석된 논문은 ridged 도파관 이론에 의해 근사적인 해만을 제공하며 2차원 TLM 모델에 의한 Shih와 Hofer<sup>[5]</sup>의 논문은 2차원 핀라인 구조의 단면과 대칭성에 따른 해석의 편리성을 위해 구조의 1/4만을 해석하였다. 또한 다른 연구자<sup>[6~11]</sup>들에 의한 논문은 정확한 해를 제공하지만 시간 소모적인 해석적 노력과 복잡한 컴퓨터 프로그램을 필요로 한다.

따라서 본 논문에서는 기하학적 구조의 변형에 따른 적용성이 뛰어난 대칭압축노드 TLM법을 이용하여 핀라인에서 유도되는 매질의 불연속에 따른 전파의 전송 특성을 해석한다. 우선 핀라인 구조상에 적용하기 위한 대칭압축노드 알고리즘을 유도하고 이를 WR-62 도파관상에 내재된 단방향 핀라인에 적용하여 시간영역상에서 유도되는 전파의 물리적 특성을 해석하고 또한 퓨리에 변환을 통해 주파수 영역으로 변환된 전파 산란계수를 구하여 TLM법을 이용한 수치해석의 단순성과 해의 우수성을 제시한다.

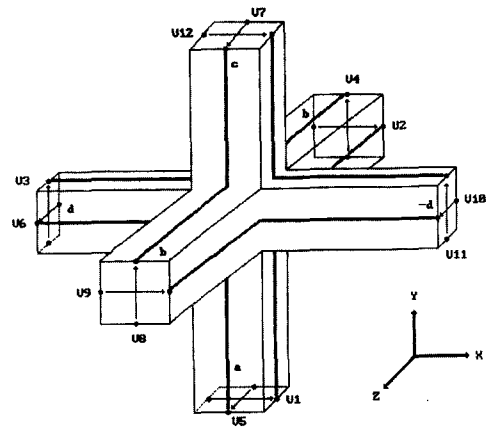
## II. 비균질 매질의 대칭압축노드 산란행렬

대칭압축노드를 이용한 TLM 모델링은 수치해석하고자 하는 해석대상을 사각형 셀로 분할하며 각각의 셀은 TEM 전송선의 집합으로 모델화된다. 여기에는 2종류의 전송선이 사용된다. 즉 링크라인은 사각형 셀의 면을 구성하는 전송선으로 E와 H필드를 정의하고 스텐브 라인은 유전체나 마그네틱 매질과 관련된 에너지 저장을 모델화하기 위해 사용된다.

그림 1은 대칭압축노드로서 포트 1~12번은 링크라인이며 13~18번은 스텐브 라인이다. 이와 같은 대칭압축노드에서 전체 전압과 전류는 노드에 입사되거나 반사되는 전압의 합과 차로써 표현된다. 따라서 대칭압축노드로부터 산란되는 행렬을 정의하면 다음과 같다.<sup>[11]</sup>



(a)



(b)

그림 1. 대칭압축노드

Fig. 1. Symmetrical condensed node.

$$V' = S V' \quad (1)$$

여기서 S는  $18 \times 18$ 의 산란행렬이며  $V'$ 은  $(k+1)\Delta t$  시간에 있어 포트에 반사되는 전압이고  $V$ 는  $k\Delta t$  시간에 있어 포트에 입사되는 전압을 의미한다. 또한 대칭압축노드의 링크라인으로부터 손실이 없는 전파 전송을 위해서 노드는 입사 여기 펄스의 모든 조합에 대해 에너지를 보존해야 하며 결국 전체 입사전력은 반사전력과 같아야 한다. 따라서 이와 같은 조건이 만족되기 위해서는 산란행렬이 단위 행렬이어야 한다는 필요 조건이 요구된다.<sup>[12]</sup> 입펄스가 포트 1에 입사될 경우 1, 2, 9, 12, 13번 포트와 1, 3, 11, 12, 18포트로부터 전류와 전압보존법칙을 만족하는 산란계수를 정의하면 다음과 같다.

$$1 - a = 2b + c + Yg \quad (2)$$

$$1 + a = 2d + c + i \quad (3)$$

여기서 a, b, c, d, i, g는 산란행렬의 미지의 계수이며 링크라인으로 산란되는 산란계수의 크기값을 정의한다. 따라서 동일한 과정을 12개의 라인과 6개의 스텐브에 적용하면 표 1과 같은 산란행렬을 구할 수 있다.

표 1. 스텐브를 갖는 대칭압축노드의 산란행렬

Table 1. Scattering matrix for symmetrical condensed node with stubs.

E필드	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
H필드	x	x	y	y	z	z	z	y	x	z	y	x	x	y	z			
	z	y	z	x	x	y	x	x	y	y	z	z				x	y	z
1	x	z	a	b	d				b		-d	c	g					i
2	x	y	b	a			d		c	-d	b	g						-i
3	y	z	d		a	b				c	-d	g						-i
4	y	x		b	a	d		-d	c		b			g			i	
5	z	x			d	a	b	c	-d	b					g	-i		
6	z	y		d		b	a	b		-d	c				g		i	
7	z	x			-d	c	b	a	d		b				g	i		
8	y	x		b	c	-d	d	a		b			g			-i		
9	x	y	b	c			-d		a	d		b	g					i
10	z	y		-d		b	c	b		d	a				g			-i
11	y	z	-d		c	b			b		a	d	g					i
12	x	z	c	b	-d				b		d	a	g					-i
13	x		e	e					e			e	h					
14	y			e	e				e				h					
15	z				e	e	e			e					h			
16	x																j	
17	y																j	
18	z	f		-f						f	-f							j

표 1에서 산란계수들의 크기값은 각 산란파라미터의 계방정식을 풀면 구해질 수 있다. 따라서 최종적인 필드값은  $\Delta t$  시간에 따른 연속적인 임펄스의 입사와 반사되는 전압에 의해 라인 전압으로부터 계산할 수 있다. 여기서 링크 라인은 자유공간의 특성 임피던스를 유지하고, 스텐브 라인은 전송선의 크기에 의존한 특성 임피던스를 갖는다. 따라서 산란과정이 일어난 후 발생하는 필드 값은 다음과 같이 전압 펄스의 크기에 의해 결정된다.

$$E_x = 2(V_1^i + V_2^i + V_9^i + V_{12}^i + Y_x V_{13}^i) / u(4 + Y_x) \quad (4)$$

$$E_y = 2(V_3^i + V_4^i + V_8^i + V_{11}^i + Y_y V_{14}^i) / v(4 + Y_y) \quad (5)$$

$$E_z = 2(V_5^i + V_6^i + V_7^i + V_{10}^i + Y_z V_{15}^i) / w(4 + Y_z) \quad (6)$$

$$H_x = 2(V_4^i - V_5^i + V_7^i - V_8^i - V_{16}^i) / Z_0 u(4 + Z_x) \quad (7)$$

$$H_y = 2(-V_2^i + V_6^i + V_9^i - V_{10}^i - V_{17}^i) / Z_0 v(4 + Z_y) \quad (8)$$

$$H_z = 2(-V_3^i + V_1^i + V_{11}^i - V_{12}^i - V_{18}^i) / Z_0 w(4 + Z_z) \quad (9)$$

### III. 가변 셀에 대한 이미턴스 변화

(4)~(9)번식에서 어드미턴스와 임피던스항은 대칭 압축노드에서 x, y, z 방향의 크기가 모두 일정한 경우에 사용되며 본 논문에서와 같이 x와 y는 동일하며 z방향에 따른 대칭압축노드의 크기가 다른 경우 스텐브 라인의 특성이 변화하게 된다. 따라서 이와같은 경우의 이미턴스 변화는 가변 셀을 이용해서 산란 행렬을 도출한다. 이와 같은 경우 셀 모양은 비정사각형 형태를 갖게되며 6개의 스텐브 라인은 셀의 형태와 매질의 특성을 모델화하기 위해 사용된다.

TLM 셀의 x, y, z 좌표를 변수  $u, v, w$  로 대신시키면 가변 매쉬 크기를 갖는 셀에 있어 스텐브 이미턴스 Y와 Z는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[13]</sup>

$$Y_x = \left[ \frac{vw}{u} \frac{\epsilon}{c\Delta t} - 2 \right] \quad (10)$$

$$Y_y = \left[ \frac{uw}{v} \frac{\epsilon}{c\Delta t} - 2 \right] \quad (11)$$

$$Y_z = \left[ \frac{uv}{w} \frac{\epsilon}{c\Delta t} - 2 \right] \quad (12)$$

$$Z_x = \left[ \frac{vw}{u} \frac{\mu}{c\Delta t} - 2 \right] \quad (13)$$

$$Z_y = \left[ \frac{uw}{v} \frac{\mu}{c\Delta t} - 2 \right] \quad (14)$$

$$Z_z = \left[ \frac{uv}{w} \frac{\mu}{c\Delta t} - 2 \right] \quad (15)$$

여기서 c는 빛 속도이며,  $\Delta t$  는 시간 간격이다.

### IV. 수치해석 및 결과 고찰

본 논문에서 해석된 핀라인 구조는 도파관의 E 평면을 따라 슬롯 라인이 삽입된 구조와 비슷하며, 형태는 그림 2에 나타냈다.

그림 2에 나타난 핀라인 구조를 해석하기 위해 사용된 TLM 셀 배열은  $100 \Delta x \times 50 \Delta y \times 250 \Delta z$ 이며 각 셀의 길이는  $\Delta x=0.158\text{mm}$ ,  $\Delta y=0.158\text{mm}$ ,  $\Delta z=0.250\text{mm}$ 이다. 전체 반복의 수는 4500회, 기판의 유전율은  $\epsilon_r=9.6$ 이다. 도체의 두께는 0으로 하였으며,  $TE_{10}$  모드로 여기시켰다.

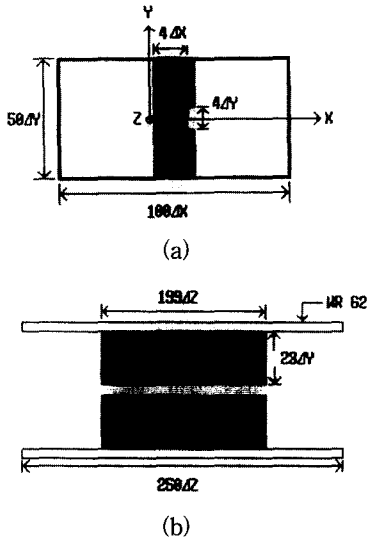


그림 2. WR-62 도파관상의 단방향 핀라인 형상 (a) 단면도 (b) 측면도

Fig. 2. Configuration of unilateral finline in WR-62 waveguide. (a) cross section (b) side view

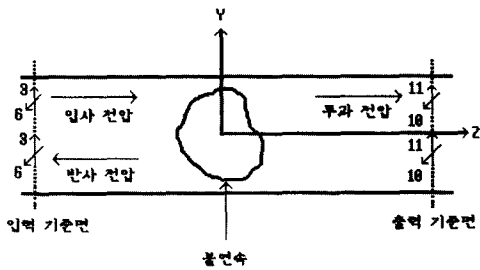


그림 3. 도파관상의 입, 출력 기준면  
Fig. 3. Input and output reference plane in a waveguide section.

$TE_{10}$  모드 전송에 있어서 전계의  $E_x$ 와  $E_z$  성분은 0이기 때문에 대칭압축노드의 6, 10, 2, 9번 노드는 항상 0이 된다. 따라서 0이 아닌 입력 전압값은 8개의 가지에 존재하게 되며, 또한  $y$ 방향에 따른 전계  $E_y$ 는 변화하지 않기 때문에 대칭압축노드의  $y$ 방향 전압을 나타내는 가지에만 입력 전압을 여기시켰다. 그림 3은 입력 전압의 여기와 출력 전압을 추출하기 위한 그림

을 나타낸다.

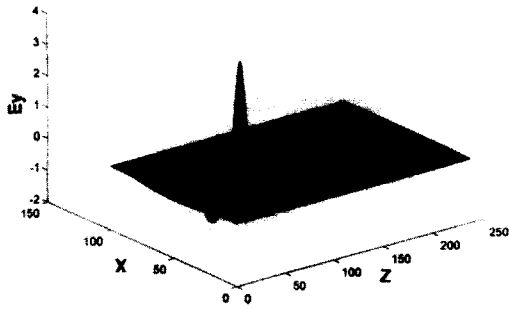
입력 기준면의 모든 대칭압축노드중에서  $TE_{10}$  우세 모드를 여기시키기 위해  $E_y$  전압에 해당되는 3번 가지에 전압을 가해준다. 이와 같이 입사된 전압은 TLM 네트워크를 통해서 불연속 핀라인이 내재된 도파관을 통해서 산란되게 되며, 일정한 반복 후 도파관의 입, 출력 기준면에 도착하게 된다.

따라서 입력 기준면의 3번 가지를 떠난 전압은 출력 기준면의 11번 가지에 그리고 단방향 핀라인의 불연속에 따라 반사되는 전압은 입력 기준면의 3번 가지에 저장되게 된다.

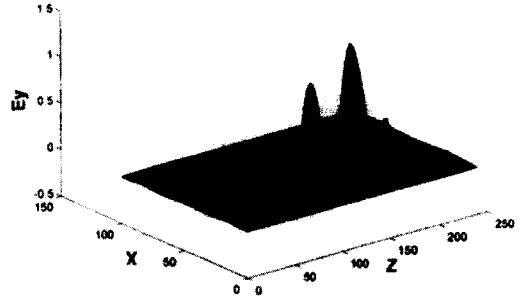
따라서 이와 같은 전송과 반사된 전압으로부터 산란 파라미터를 구할 수 있다. 또한 그림 3의 기준면에 Eswarappa가 제안한 광대역 흡수경계조건<sup>[14]</sup>을 적용하였다. 이것은 특정 임피던스로 종단된 무한히 긴 스테르브를 부가하여 산란되는 에너지가 손실 스테르브에서 흡수되어 반사가 일어나지 않도록 하기 위한 것이다.

그림 4(a)는 그림 2의 핀라인 구조에 전압을 여기한 후 450회 반복에 따른  $E_y$  필드 성분의 변화이며 핀라인의 슬롯 사이에 필드가 집중되는 현상과 반사가 이루어지는 현상이 고찰된다.

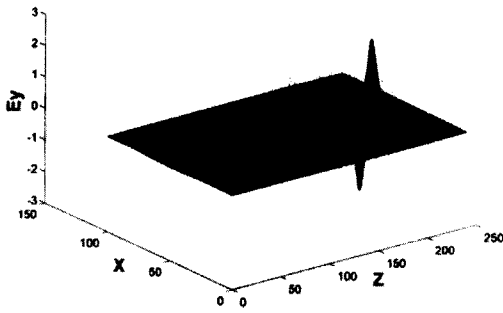
또한 그림 4(b)~그림 4(e)에 450회씩 반복이 증가된 후의 필드 변동 현상을 나타냈다. 그림 5와 그림 6은 전계 성분으로부터 푸리에 변환하여 구한 전송계수와 반사계수 특성이며, 비교 데이터는 참고문헌 [11]의 결과를 이용하였다. 참고문헌 [11]의 실험 데이터와의 비교에서 오차가 많이 나는 것은 논문에서 언급되어 있듯이 제조상의 결함으로 차단주파수가 500 MHz 정도 이동되어 있기 때문이며, 스펙트럴 영역법과 modal 해석법을 조합해서 수치해를 구한 참고문헌 [11]의 시뮬레이션 데이터는 차단 주파수가 거의 등간격으로 일정하게 발생하는데 반해 본 논문에서 TLM법을 이용해서 해석한 데이터는 고주파 영역으로 주파수가 증가할수록 차단주파수가 보다 빨리 발생하는 현상을 볼 수 있다. 이는 TLM 해석법 자체가 셀로 분할해서 수치해석하는 방법이기 때문에 고주파 영역에서 차단주파수가 보다 빨리 생성되는 현상으로 생각되며, 또한 산란 파라미터를 구하는데 있어 우세 모드의 추출을 위해 전파 진행방향의 입,출력 기준면을 참고문헌 [11]의 스펙보다 보다 길게 잡아서 생긴 오차로 고찰된다.



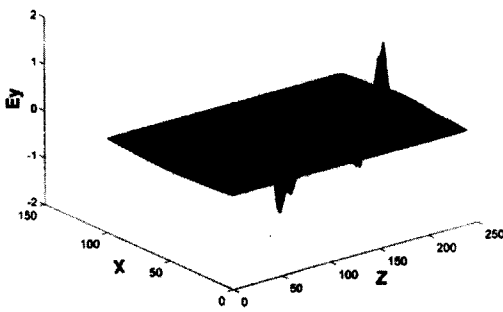
(a)



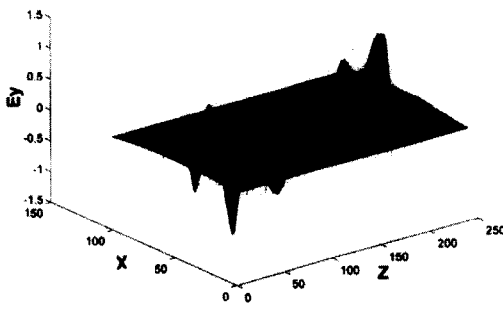
(e)



(b)



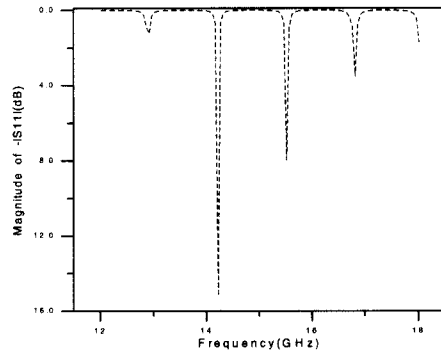
(c)



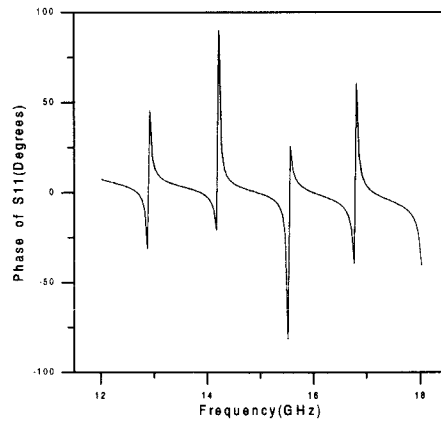
(d)

그림 4. WR-62 도파관상의 단방향 핀라인의 필드 변화 (a) 450회 반복 (b) 900회 반복 (c) 1350회 반복 (d) 1800회 반복 (e) 2250회 반복

Fig. 4. Field variation of unilateral finline in WR-62 waveguide. (a) 450th iteration (b) 900th iteration (c) 1350th iteration (d) 1800th iteration (e) 2250th iteration



(a)



(b)

그림 5. WR-62 도파관상 단방향 핀라인의  $S_{11}$  (a) 크기 (b) 위상

Fig. 5.  $S_{11}$  of unilateral finline in WR-62 waveguide. (a) magnitude (b) phase

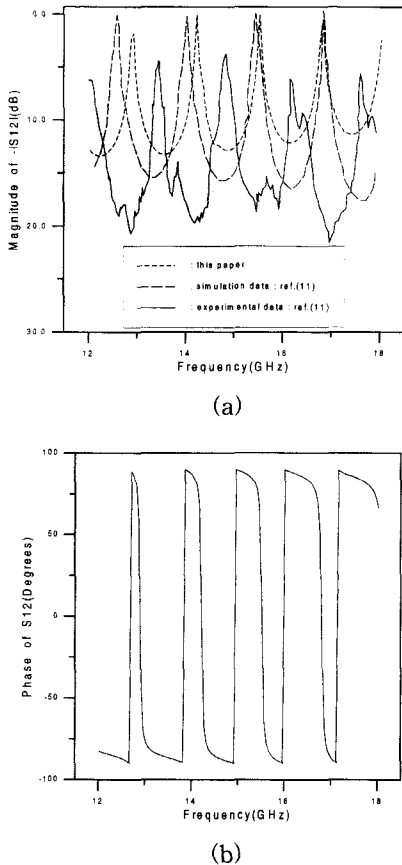


그림 6. WR-62 도파관상 단방향 핀라인의  $S_{12}$ . (a) 크기 (b) 위상  
Fig. 6.  $S_{12}$  of unilateral finline in WR-62 waveguide. (a) magnitude (b) phase

## V. 결 론

본 논문에서는 대칭압축노드 TLM법을 이용하여 매질에 따른 불연속 구조를 갖는 단방향 핀라인에 대한 특성을 해석하였다. 핀라인 구조의 해석에 있어 기본적인 노드의 형태는 대칭압축노드를 이용하였다. 수치해석 과정은 산란 행렬을 유도하고, 이와 같은 산란 행렬로부터 해석구조의 이산화와 대칭압축노드의 입사 필드 결정,  $\Delta t$ 시간에 따른 일정한 반복과정 후 출력 값의 도출로 이루어졌으며 추출된 전자계의 성분으로부터 핀라인의 시간영역해와 주파수영역해가 구해졌다.

핀라인 해석시 도파관상의 기준면으로부터  $TE_{10}$  우세 모드를 여기시키고 입력 기준면의 3번 가지로 반사되어 오는 반사파를 검출하고 또한 출력 기준면의 11번 노드로 전송되는 투과파의 성분을 이용하여 반사계

수와 전송계수를 구하였다. 반사계수와 전송계수를 구하는데 있어 구조에 따른 기준면의 선택이 중요하며, 이는 정확한 산란 파라미터를 구하기 위해 고차모드의 입,출력단 도달을 억제시키고 우세모드만을 기준면에 도달시키기 위한 것이다. 본 논문에서 제시된 결과는 기존의 해석결과와 잘 일치함을 확인하였으며 주파수 영역 해석에 한정된 기존의 논문과 달리 시간영역에 대한 수치해의 제시로 핀라인 구조에 대한 보다 명확한 물리적인 특성을 이해하는데 도움이 되리라 생각한다. 향후 연구과제로는 대부분의 수치해석법이 갖게 되는 공통점으로 개방된 경계를 갖는 구조에 있어 경계조건 적용시 대용량의 메모리를 발생하게 되는 단점에 따라 효율적인 경계 설정으로 인한 계산 시간 단축과 안테나와 산란 특성 해석을 위한 TLM법의 적용에 관한 연구도 수행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. B. Johns, "A Symmetrical Condensed Node for the TLM Method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 35, no. 4, pp. 370-377, April. 1987.
- [2] S. Akhtarzad and P. B. Johns, "Three Dimensional Transmission-Line Matrix Computer Analysis of Microstrip Resonators," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, no.12, pp. 990-997, Dec. 1975.
- [3] P. J. Meier, "Integrated Fin-Line Millimeter Components," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-22, pp. 1209-1216, Dec. 1974.
- [4] A. M. K. Saad and G. Begemann, "Electrical Performance of Fin-Lines of Various Configurations," *Microwaves, Opt. Acoust.*, vol. 1, pp 81-88, Jan. 1977.
- [5] Yi-Chi Shih and Wolfgang J. R. Hoefler, "Dominant and Second-Order Mode Cutoff Frequencies in Fin Lines Calculated with a Two-Dimensional TLM Program," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 28, no. 12, pp. 1443-1448, Dec. 1980.
- [6] J. B. Knorr and P. M. Shayda,

- "Millimeter-Wave Fin-Line Characteristics," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-28, pp. 737-743, July. 1980.
- [7] L. P. Schmidt and T. Itoh, "Spectral Domain Analysis of Dominant and Higher Order Modes in Fin-Lines," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-28, pp. 981-985, Sept. 1980.
- [8] A. Beter and I. Wolff, "A Solution of the Earthed Fin-Line with Finite Metallization Thickness," in 1980 IEEE MTT-S. Int. Microwave Symp. Dig., pp. 258-260.
- [9] H. E. Hennawy and K. Schunemann, "Impedance Transformation in Fin Lines," IEE Proceedings, vol. 129, Pt. H, no. 6, pp. 342-350, Dec. 1982.
- [10] R. Sorrentino and T. Itoh, "Transverse Resonance Analysis of Finline Discontinuities," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-32, no. 12, pp. 1633-1638, Dec. 1984.
- [11] M. Helard, J. Citerne, O. Picon and Victor Fouad Hanna, "Theoretical and Experimental Investigation of Finline Discontinuities," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-33, no. 10, pp. 994-1003, Dec. 1985.
- [12] R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering. New York : McGraw-Hill, 1966.
- [13] 김태원, "3차원 대칭압축노드 TLM법을 이용한 마이크로웨이브 전송선의 수치해석," 중앙대학교 박사학위논문, 1997. 6
- [14] Eswarappa, George I. Costache and Wolfgang J. R. Hoefer, "Transmission Line Matrix Modeling of Dispersive Wide-Band Absorbing Boundaries with Time Domain Diakoptics for S-Parameter Extraction," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 38, no. 4, pp.379-385, April. 1990.

---

 저 자 소 개
 

---


 金 泰 源(正會員)

1963년 3월 10일생. 1986년 2월 청주대학교 이공대학 전자공학과 졸업(공학사). 1990년 8월 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년 8월 중앙대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1997년 9월 ~ 현재 상지대학교병설전문대학 전자과 전임강사. 주관심 분야는 안테나 특성 해석, 전자장 수치해석, RF 회로설계