

Adaptive Frequency Sampling 을 이용한 등가회로 모델링

Equivalent Circuit Modeling applying Adaptive Frequency Sampling

백 현*, 김군태*, 강승택**, 김형석***

Hyun Paek, Koon-Tae Kim, Sungtek Kahng, Hyeong-seok Kim

Abstract

In this paper, we propose a method that applies Adaptive Frequency Sampling(AFS) technique to the equivalent circuit model for RF passive components. These days wireless communication system is getting smaller and smaller. So EMI/EMC is an issue in RF. We can solve PI(Power Integrity)/SI(Signal Integrity) that one of EMI/EMC problem apply IFFT for 3D EM simulation multiple with input signal. That is time consuming task. Therefore equivalent circuit model using RF passive component is important. AFS schemes are implemented to obtain the rational functions. S parameters of the equivalent circuit model is compared to those of EM simulation in case of the microstrip line structure.

Keywords : equivalent circuit modeling, adaptive frequency sampling, rational fitting

I. 서론

오늘날 휴대용 무선 통신 기기는 디지털 회로부와 RF 회로부를 하나의 PCB에 통합하면서 소형화 되고 있다. 이러한 흐름으로 점점 EMI/EMC 문제가 커지고 있다[1~3]. EMI/EMC 문제중의 하나인 PI(Power Integrity)/SI(Signal Integrity)를 해석하기 위해서는 3D EM 시뮬레이션을 통한 주파수 응답 데이터와 입력 신호의 주파수 응답 데이터의 곱의 IFFT를 구해서 시간영역에서의 입력신호응답을 찾아내는 방법을 이용하였다. 하지만 이런 방법은 시간 소요가 오래 걸린다는 단점이 있다. 이러한 문제점의 해결방안으로 수동소자를 이용한 등가회로 모델링에 대한 연구가 가속화되어 가고 있다. 본 논문에서는 Adaptive Frequency Sampling(AFS)을 매트랩에 적용하여 3D EM 시뮬레이션 결과를 유리함수 근사화 하고, 이 결과를 이용해 수동소자의 등가회로 하는 방법을 제안한다. II 장에서는 AFS를 이용한 유리함수 근사를, III장에서는 유리함수 근사를 이용한 등가회로 모델을, IV장에서는 실제로 마이크로스트립 기판 구조의 EM시뮬레이션 결과를 이용하여 수동소자의 등가회로 모델링 구현 후 S파라미터를 비교하였다.

II. Adaptive Frequency Sampling

3D EM 해석 결과를 유리함수로 근사화시키는 방법으로 Adaptive Frequency Sampling을 이용하였다. AFS는 적은 수의 sampling 개수로 주파수 응답 데이터를 유리함수 근사화 하는 방법이다. 근사되는 유리함수의 기본적인 식의

형태는 다음 식 (1)과 같다[4~6].

$$f(s) = \frac{\sum_{k=0}^u a_k s^k}{1 + \sum_{k=0}^p b_k s^{k+1}} \quad (1)$$

여기서 s 는 $j\omega$, a_k 와 b_k 는 각각 분자와 분모의 계수이다. 위 식 (1)을 근사화 하는 알고리즘은 다음 그림 1과 같다.

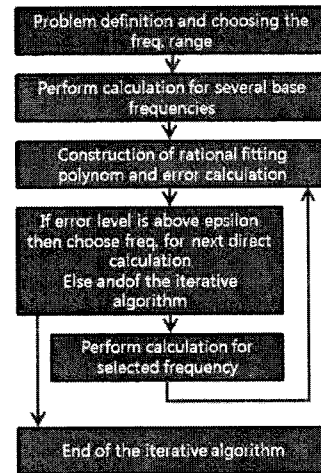


그림 1. AFS의 근사화 알고리즘

먼저 근사화할 EM 해석 결과의 초기 세 점을 이용하여, 함수를 근사화한다. 근사화한 함수와 본래의 EM 해석결과를 비교하여 가장 큰 차이를 가지는 한 점을 추가하고, 네 점을 이용하여 함수를 다시 근사화 한다. 이렇게 EM 해석 결과를 바탕으로 샘플링 개수를 늘려가면서, 근사화한 함수를 만들 수 있다.

샘플링된 점을 이용하여 근사 함수를 만드는 방법은 식 (1)을 정리하여 $Ax = B$ 의 함수로 만들어서 근사 함수를

접수일자 : 2009년 8월 04일
 최종완료 : 2009년 8월 14일
 *중앙대학교 전자전기공학부 대학원
 **인천대학교 정보통신공학과
 ***중앙대학교 전자전기공학부
 교신저자, E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr

구성한다. 정리된 식은 식 (2)와 같다.

$$f(s)(1 + \sum_{k=0}^p b_k s^{k+1}) = \sum_{k=0}^q a_k s^k$$

$$f(s) \sum_{k=0}^p b_k s^{k+1} - \sum_{k=0}^q a_k s^k = -f(s) \quad (2)$$

정리된 식 (2)를 식 (3)과 같이 행렬식 $Ax = B$ 의 형태로 정리한다.

$$\begin{pmatrix} f(s_1)s_1 & f(s_1)s_1^2 & \dots & f(s_1)s_1^{p-1} & \dots & -1 & -s_1 & -s_1^2 & \dots & -s_1^p \\ f(s_2)s_2 & f(s_2)s_2^2 & \dots & f(s_2)s_2^{p-1} & \dots & -1 & -s_2 & -s_2^2 & \dots & -s_2^p \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f(s_n)s_n & f(s_n)s_n^2 & \dots & f(s_n)s_n^{p-1} & \dots & -1 & -s_n & -s_n^2 & \dots & -s_n^p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_p \\ a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(s_1) \\ f(s_2) \\ \dots \\ f(s_n) \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 n 은 샘플링된 점의 개수, p 는 분모의 차수, q 는 분자의 차수이다. 식 (3)을 행렬로 구성해서 계수 a 와 b 를 구할 수 있고, 근사된 함수 $f(s)$ 를 구할 수 있다.

하지만 이렇게 함수를 근사화하면, 본래 주파수 응답데이터가 복소수로 이루어져 있기 때문에, 계수 a 와 b 는 복소수로 만들어진 함수로 근사화된다. 근사화된 함수를 등가회로 모델로 근사화 하기 위해서는 근사된 함수의 계수는 반드시 실수로 근사해야만 한다.[7] 함수를 근사화 하는 과정에서 계수를 실수로 근사화 하기 위해서는 식 (2)의 계수 a 와 b 를 실수로 가정하고, $s = j\omega$ 를 두고, 식 (4)~(8)과 같이 복소수와 실수부분을 각각 다시 계산하게 된다.

$$H_R(\omega) + jH_I(\omega) = -(H_R(\omega) + jH_I(\omega)) \sum_{k=0}^p b_k s^{k+1} + \sum_{k=0}^q a_k s^k \quad (4)$$

$$\sum_{k=0}^p b_k s^k = j \sum_{k=0}^{\frac{p}{2}} b_{2k} (-1)^k \omega^{2k+1} + \sum_{k=1}^{\frac{p}{2}} b_{2k-1} (-1)^k \omega^{2k} \quad (5)$$

$$\sum_{k=0}^q a_k s^k = \sum_{k=0}^{\frac{q}{2}} a_{2k} (-1)^k \omega^{2k} - j \sum_{k=1}^{\frac{q}{2}} a_{2k-1} (-1)^k \omega^{2k-1} \quad (6)$$

$$H_R(\omega) = H_I(\omega) \sum_{k=0}^{\frac{p}{2}} b_{2k} (-1)^k \omega^{2k+1} - H_R(\omega) \sum_{k=1}^{\frac{p}{2}} b_{2k-1} (-1)^k \omega^{2k} \quad (7)$$

$$+ \sum_{k=0}^{\frac{q}{2}} a_{2k} (-1)^k \omega^{2k}$$

$$H_I(\omega) = -H_R(\omega) \sum_{k=0}^{\frac{p}{2}} b_{2k} (-1)^k \omega^{2k+1} - H_I(\omega) \sum_{k=1}^{\frac{p}{2}} b_{2k-1} (-1)^k \omega^{2k} \quad (8)$$

$$- \sum_{k=1}^{\frac{q}{2}} a_{2k-1} (-1)^k \omega^{2k-1}$$

이렇게 개선된 AFS방법을 이용하여 EM 해석 결과를 계수가 실수로 구성된 함수로 근사화 한다.

III. 근사된 유리함수를 이용한 등가회로 모델링

등가회로 모델로 구현하기 위해 그림 2의 PI형 회로로

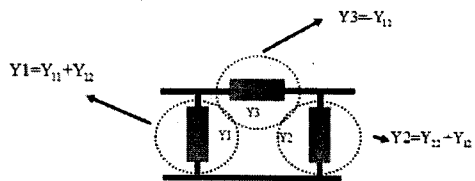


그림 2. 등가회로 모델로 구현하기 위한 PI형 등가회로

구성하고, 각각의 브랜치를 유리함수로 근사화 한다.

PI형으로 구성된 각 브랜치의 주파수 응답에 대한 전달 함수와 근사된 함수를 회로로 모델링한다. 그림 3에 PI형 등가회로 모델의 각각의 브랜치 구성이 나타나 있다[7].

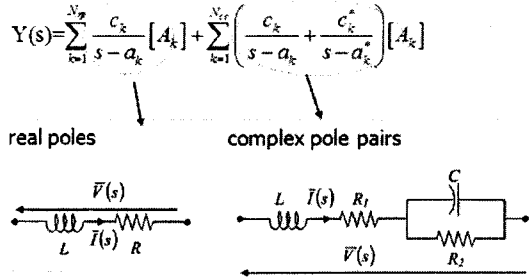


그림 3. PI형 등가회로의 각각의 브랜치 구성

회로 모델로 구현하기 위해 근사된 함수식 중 complex pole pair에 해당 하는 부분을 회로와 주파수 응답결과를 그림 4와 식 (9)에 나타내었고, 근사된 함수식은 식 (10)에 나타내었다.

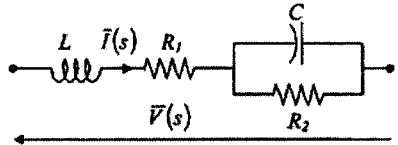


그림 4. complex pole pair에 대한 회로 모델

$$Y(s) = \frac{1}{L} \frac{(s + \frac{1}{R_2 C})}{(s^2 + (\frac{R_1}{L} + \frac{1}{R_2 C})s + (\frac{R_1}{L} \frac{1}{R_2 C} + \frac{1}{LC}))} \quad (9)$$

$$F(s) = \frac{res_1}{s - p_1} + \frac{res_2}{s - p_2} \quad (10)$$

$$= \frac{(res_1 + res_2)s - (res_1 p_2 + res_2 p_1)}{s^2 - (p_1 + p_2)s + p_1 p_2}$$

$$= \frac{(res_1 + res_2)s}{s^2 + sc + d} + \frac{-(res_1 p_2 + res_2 p_1)}{s^2 + sc + d}$$

식 (9)와 식 (10)을 정리하면, 각각의 회로값을 pole과 residue로 나타낼 수 있고, 식 (11)에 정리하였다.

$$L = \frac{1}{res_1 + res_2} \quad (11)$$

$$R_1 = \frac{1}{(res_1 + res_2)} \times [- (p_1 + p_2) + \frac{1}{(res_1 + res_2)} (res_1 p_2 + res_2 p_1)]$$

$$C = \frac{(res_1 + res_2)}{p_1 p_2 + [-(p_1 + p_2) + \frac{1}{res_1 + res_2} (res_1 p_2 + res_2 p_1)]} \frac{(res_1 + res_2)}{res_1 p_2 + res_2 p_1}$$

$$R_2 = -\frac{1}{C} \frac{res_1 + res_2}{(res_1 p_2 + res_2 p_1)}$$

IV. 등가회로 모델의 구현 및 주파수 영역 해석 결과

그림 5에서 $\epsilon_r = 10.2$, $\tan \delta = 0.002$, 그리고 두께는

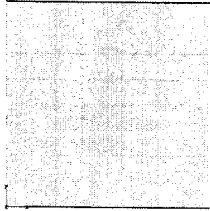
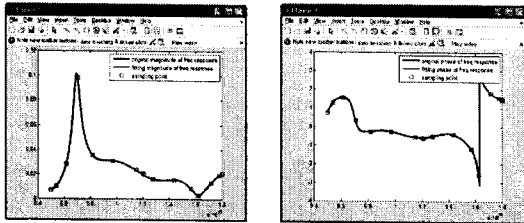
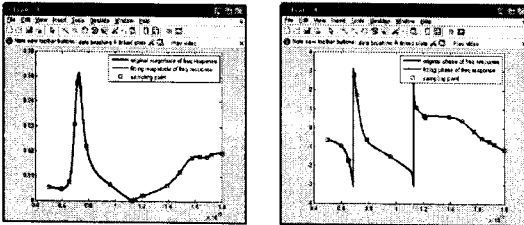


그림 5. DGS구조의 마이크로스트립 대역 통과 필터

0.017[mm]인 기판이 사용되었다. 그림 5의 구조를 FDTD방식의 EM 시뮬레이터로 해석을 한후 S 파라미터를 추출하였다. 추출한 S파라미터를 Y파라미터로 변환한 후 AFS를 이용하여 유리함수로 근사한 결과를 그림 6에 나타내었다.



(a) Y1의 유리함수 근사 결과



(b) Y2의 유리함수 근사 결과

그림 6. AFS으로 근사된 Y파라미터 결과

그림 7은 ADS를 이용하여 구현된 등가회로 모델을 나타내었고, 그림 8은 등가회로 모델과 EM해석된 모델의 주파수 응답결과를 나타내었다. 이를 이용하여 등가회로 모델이 DGS구조의 마이크로 스트립 라인의 전자기적 특성을 재현할 수 있음을 보여준다.

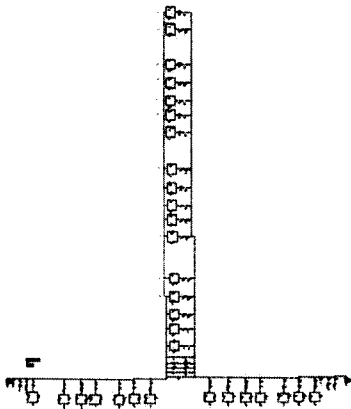
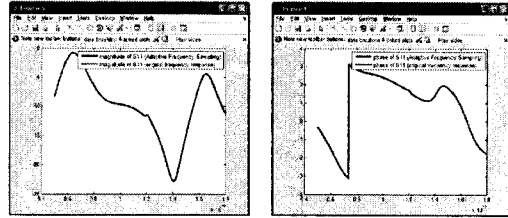
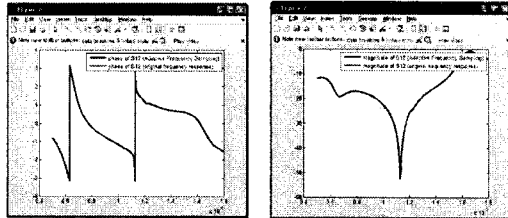


그림 7. ADS를 통해 구현된 등가회로 모델



(a) S11



(b) S12

그림 8. 등가회로 모델과 EM해석된 모델의 주파수 응답 결과

III. 결 론

AFS를 이용하여 DGS구조의 마이크로스트립 라인의 주파수 해석 결과를 유리함수 근사하여 등가회로 모델을 구현하였다. EM 해석결과와 등가회로 모델의 주파수 영역 해석 결과가 유사함을 확인할 수 있었다. 3차원 EM 해석 대신에 등가회로 모델을 이용할 경우 EMI/EMC분석의 해석 시간 단축 시킬수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2008-14) 주관으로 수행된 과제임.

[참고 문헌]

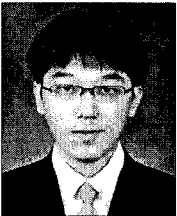
- [1] S. H. Min, M. Swaminathan, "Construction of broadband passive macromodels from frequency data for simulation of distributed interconnect networks," *IEEE Trans. Electromagnetic compatibility*, vol. 46, no.4 pp. 544-558, Nov, 2006.
- [2] G. Antonini, A. C. Scogna, A. Orlandi, V. Ricchiuti, G. Selli, S. Luan, J. L. Drewniak, "Validation of circuit extraction procedure by means of frequency and time domain measurement," *Electromagnetic compatibility 2005. EMC International Symposium on*, vol. 1, pp. 45-50, Aug, 2005.
- [3] K. L. Choi, N. Na, S. Madhavan, "Characterization of Embedded Passive Using Macromodels in LTCC Technology", *IEEE Trans. components, packaging, and manufacturing tech.*, vol. 21, no.3, Aug, 1998.
- [4] Y. W. Kim, H. Ling, "Equivalent circuit modeling of broadband antennas using a rational function approximation", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol 48, no. 5, May 2006.

- [5] B. Gustavsen, S. Adam, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting", *IEEE Trans on Power Delivery*, vol. 14, no.3, July, 1999.
- [6] T. Dhaene, J. Ureel, N. Fache, D. De Zutter "Adaptive frequency sampling algorithm for fast and accurate S-parameter modeling of general planar structures", *IEEE MTT-S int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1427-1430, May, 1995.
- [7] Giulio Antonini, "SPICE Equivalent Circuit of Frequency-Domain Responses", *IEEE Trans on Electromagnetic compatibility*, vol. 45, no.3, pp.502-512, Aug. 2003.



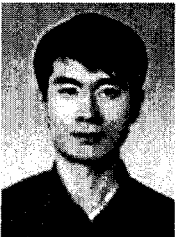
백 현

2008년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업
2008년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사 재학중
<관심분야> EMI/EMC, Passive Component,
<e-mail> darmi@hanafos.com



김 군 태

2008년 서경대학교 정보통신공학과 졸업(공학사)
2008년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
<관심분야> 전자기 응용 소자 및 최적설계,
Antenna, Optimization Design,
<e-mail> anodrr@naver.com



강 승 태

2002년 한양대학교 전자통신공학과(공학박사)
2000년 2월~2000년 4월 한양대학교 산업과학 연구소 연구원
2000년 4월~2004년 2월 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
2004년 3월~현재 인천대학교 정보통신학과 교수

<e-mail> s-kahng@incheon.ac.kr



김 형 석

1985년 서울대학교 전기공학과 공학사
1987년 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1990년 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
1990~2002년 순천향대학교 정보기술 공학부 부 교수
1997~1998년 RPI 미국 방문 교수

2002~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수

<관심분야> 전자장 및 수치해석, RF 및 마이크로웨이브 소자 해석 및 설계
<e-mail> kimcaf2@cau.ac.kr