

Electromagnetic Topology를 이용한 능동소자가 포함된 회로의 동작 특성 해석

論 文
57-5-14

Operational Characteristics Analysis of Circuits with Active Element on Electromagnetic Topology

權五旭* · 朴允美** · 鄭容植*** · 千昌律§ · 鄭炫教†

(Ohwook Kwon · Yoon-Mi Park · Young-Seek Chung · Changyul Cheon · Hyun-Kyo Jung)

Abstract - Recently as a progress of electric technology, modern electric systems become more and more complicated. Thus, it is difficult to use a classical method to analyze responses of the systems in complicated electromagnetic environments because there are so many coupling phenomena. The electromagnetic topology (EMT) is a helpful solution to analyze electromagnetic interference / electromagnetic compatibility (EMI/EMC) of the large complex system. In this paper, EMT is applied to analyze an active element. And then to prove the validity of this analysis, a detector circuit including Schottky barrier diode is analyzed by EMT when input power is given directly.

Key Words : BLT equation, Electromagnetic Interference/Compatibility (EMI/EMC), Electromagnetic Topology (EMT), Power Detector

1. 서론

최근 전자기기에 사용되는 주파수가 높아져 가면서 외부로부터 들어오는 전자파가 회로의 동작에 영향을 미칠 수 있는 경우가 증가하고 있다. 특히 해석 대상이 크고 복잡한 회로의 경우 외부 field와의 커플링(coupling) 현상에 의한 해석이 기존의 방법으로는 한계가 있다. 소스에서 방사되어 시스템의 틈이나 케이블을 통해 들어오는 전자파가 회로의 소자와 커플링을 일으켜 미치는 영향을 해석하기 위해서는 회로의 물리적인 구조에 대하여 모델링을 하여야 한다. 회로가 크고 복잡할 경우 모델링은 많은 자원과 시간이 필요하여 어려움이 있다. 회로의 동작을 모의하기 위해서 회로 해석을 한다면 모델링은 간단하지만 외부의 전자파에 의한 커플링은 고려하기 어렵다. 즉 크고 복잡한 시스템에 대하여 커플링 현상을 고려하여 회로가 받는 전자파의 영향을 해석하는 것은 복잡한 과정과 많은 시간이 필요하다. 이런 문제점을 해결하기 위한 하나의 대안으로 Electromagnetic Topology (EMT)를 이용한 해석 방법을 제안한다.

EMT의 해석과정은 크고 복잡한 시스템을 해석하기 쉬운 작은 시스템으로 나누는 것에서부터 시작된다. 나뉜 각 시스템의 특성 값을 구한 후 매트릭스를 이용해서 전체 시스템의 특성으로 다시 재구성한다. 재구성된 전체 시스템을

해석하기 위하여 junction과 tube로 이루어진 topological diagram이 사용된다. 규모가 큰 시스템에서의 해석을 용이하게 하기 위하여 사용된 topology를 복잡한 EM 커플링의 해석에 적용하는 것이다. Topological diagram에서의 각 junction 또는 tube간에는 EM 커플링이 존재하므로 이것을 전체시스템에서 표현하기 위하여 Baum-Liu-Tesche(BLT) 방정식이 사용된다[1].

BLT 방정식은 1980년대 Baum, Liu, Tesche 3명에 의해 연구된 EM 해석 방법이다. BLT 방정식은 복잡한 시스템에서 전송 선로 이론을 이용하여 topological diagram 내의 junction, tube와 소스간의 관계를 시스템 행렬방정식을 통해 나타내어 시스템의 응답을 구할 수 있는 방법이다. 복잡한 시스템을 해석이 용이한 작은 시스템으로 나누어 해석하므로 해석시간을 단축할 수 있고, 다양한 해석 방법을 적용할 수 있으므로 기존의 회로해석 방법 보다 정확성을 높일 수 있는 장점이 있다[1][2].

EMT는 이전부터 항공기나 위성로켓과 같은 큰 시스템이 electromagnetic pulse에 의해 받는 영향을 해석하기 위하여 사용되었다[3]. 그 후 회로 해석 방법으로 제안되었으며[4], 본 논문에서는 기존의 수동소자를 포함한 회로해석에서 나아가 능동소자까지 포함한 회로에 적용하고자 한다. 그러기 위하여 능동소자로서 하나의 다이오드를 EMT를 이용하여 해석해보고 다이오드가 포함된 검파회로의 동작을 해석하여 검증해보았다.

2. EMT를 이용한 해석

2.1 Topological Diagram 구성

해석하고자 하는 대상을 해석하기 쉬운 작은 볼륨으로 나

* 學生會員 : 서울대 공대 전기컴퓨터공학부 석사졸업
** 學生會員 : 서울대 공대 전기컴퓨터공학부 박사과정
*** 正會員 : 광운대학교 전파공학과 교수
§ 正會員 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터 공학부 교수
† 교신저자, 正會員 : 서울대 공대 전기컴퓨터공학부 정교수
E-mail : hkjung@snu.ac.kr
接受日字 : 2008年 1月 22日
最終完了 : 2008年 3月 5日

는 후 각 볼륨 간의 커플링이 되는 관계를 나타내기 위하여 그림 1과 같은 topological diagram을 이용한다. 회로의 해석에서 수동소자나 IC칩과 같은 능동소자를 junction으로 나타내거나 특정 시스템 전체를 하나의 junction으로 나타내기도 한다. 특히 하나의 시스템을 junction으로 나타낸 경우 equivalent junction이라고 한다. 그리고 junction과 junction을 잇는 선을 tube라 하며 회로에서 소자를 이어주는 신호선을 나타낸다. Junction과 tube를 나타내는 특성값으로 산란(scattering) 특성을 이용한다. 소스에 의한 커플링은 tube에 인가되는 등가소스로 표현한다[5][6].

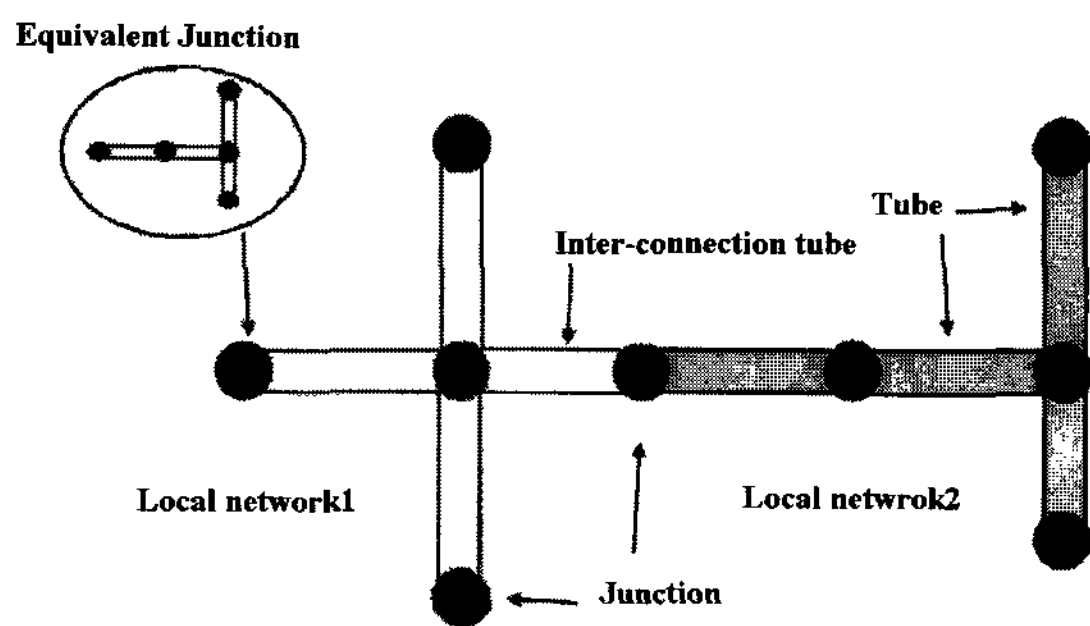


그림 1 Topological diagram
Fig. 1 Topological diagram

2.2 Network Equation

Junction에서의 모든 데이터는 입사파인 $W_i(0)$ 와 반사파인 $W_j(L)$ 로 표현된다. Junction에서의 wave의 특성화는 이 두 가지 wave의 상호 관계와 관계가 있고 scattering parameter로 표현된다. Scattering parameter는 주파수 분포 상에서 입력 전압 대 출력전압의 비를 의미한다. Junction과 tube에서의 입출력 전자파들의 관계를 나타내기 위해서 junction에서는 scattering parameter의 reflection parameter와 transmission parameter를 사용하고 tube에서는 transmission parameter를 사용한다[7].

$$W_j(L) = S_{ij} W_i(0) \tag{1}$$

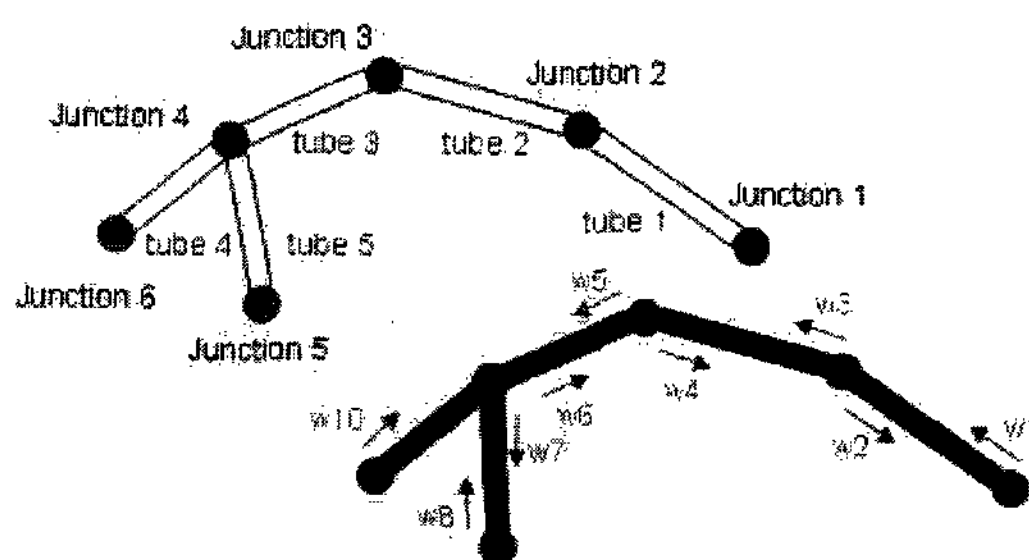


그림 2 Topological diagram에서 numbering된 wave
Fig. 2 Numbering waves in topological diagram

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10
w1	0	S_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0
w2	S_{21}	0	0	S_{24}	0	0	0	0	0	0
w3	S_{31}	0	0	S_{34}	0	0	0	0	0	0
w4	0	0	S_{43}	0	0	S_{46}	0	0	0	0
w5	0	0	S_{53}	0	0	S_{56}	0	0	0	0
w6	0	0	0	0	S_{65}	0	0	S_{68}	0	S_{610}
w7	0	0	0	0	S_{75}	0	0	S_{78}	0	S_{710}
w8	0	0	0	0	0	0	S_{87}	0	0	0
w9	0	0	0	0	S_{95}	0	0	S_{98}	0	S_{910}
w10	0	0	0	0	0	0	0	0	S_{109}	0

그림 3 Junction의 Scattering supermatrix [S]
Fig. 3 Scattering supermatrix[S] of the junction

그림 3은 그림 2의 topological diagram에서 각 junction의 모든 산란 정보를 보여준다. Junction에서의 scattering equation은 다음 식 (1)과 같다.

Junction에서의 scattering matrix [S]에서 열(column)은 입사파를 의미하고 행(row)은 출력파를 의미한다. 전체 시스템의 scattering matrix는 그림 3과 같이 scattering supermatrix로 나타낸다. S_{ij} 에서 j는 입력파를 나타내고 i는 출력파를 의미한다. 이와 같이 각 junction의 scattering parameter 결과를 scattering supermatrix에 대입해서 전체 junction들의 커플링 경로를 나타내고 있다.

마찬가지로 tube에서는 transmission parameter를 propagation supermatrix [Γ]를 구성하고 tube에 인가되는 소스항으로 supervector [W_s]를 구성한다[1].

2.3 BLT Equation

네트워크상에서의 커플링 식은 전체 네트워크의 scattering equation과 propagation equation에 의해 일반화된다. 이러한 일반화 식에서 $W(0)$ 는 junction에서의 반사파를 의미하며 $W(L)$ 은 junction에서의 입사파를 의미한다. BLT(Baum, Liu, Tesche) equation에서는 위의 방법을 통해 구한 scattering supermatrix와 propagation supermatrix 그리고 supervector를 식 (2), (3), (4)에 대입하여 각 junction으로 들어가는 전압인 $W(0)$ 와 각 junction에서 나오는 전압인 $W(L)$ 을 구하고 두 전압을 합하면 선로의 각 지점에서의 전압을 구할 수 있다. 구해진 전압이나 전류를 통해 한 지점에서의 주파수 특성 등을 구할 수 있고 전체 시스템의 특성을 파악할 수 있다[1][2].

$$[W(0)] = ([I] - [S] \times [\Gamma])^{-1} \times [S] \times [W_s] \tag{2}$$

$$[W(L)] = [\Gamma] \times [W(0)] + [W_s] \tag{3}$$

$$[W_{total}] = [W(0)] + [W(L)] \tag{4}$$

여기서 [S]는 scattering supermatrix, [Γ]는 propagation supermatrix, [W_s]는 supervector를 말한다.

3. 능동 소자의 해석 방법

일반적인 능동소자로서 간단한 다이오드를 EMT를 이용하여 해석해보았다. 제조사를 통해서 이미 산란특성을 알

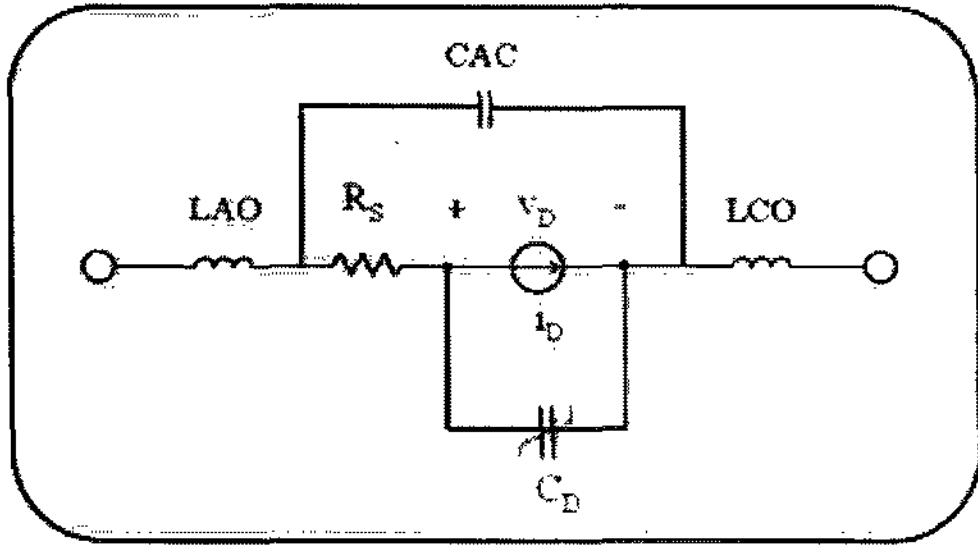


그림 4 패키지 기생성분이 포함된 다이오드의 SPICE 등가 회로

Fig. 4 SPICE equivalent circuit of diode including parasitic parameter

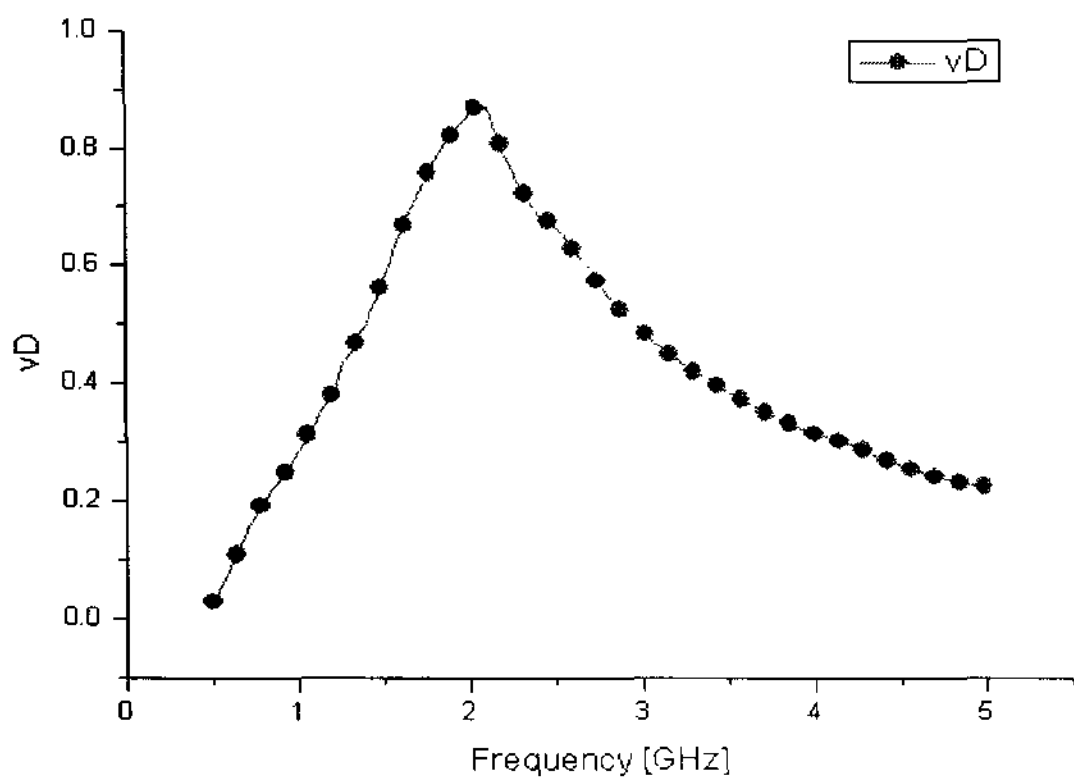


그림 5 주파수 변화에 따른 다이오드 전압의 변화

Fig. 5 Variation of diode voltage with frequency

수 있는 Infineon사의 BAT 62-02W라는 다이오드를 해석 모델로 정하여 특성을 해석해보았다. 다이오드의 산란 특성을 알기 위하여 그림 4와 같이 SPICE 등가회로 모델링을 통하여 해석하였다[8]. 등가회로는 1개의 다이오드에 흐르는 전류 i_D 와 비선형적인 특성을 나타내어주는 커패시터 C_D , 기생저항인 R_S , 패키지 기생성분을 모델링한 LAO, LCO, CAC로 모델링할 수 있다. 다이오드는 능동 소자로 I-V 특성 곡선을 따라서 주파수 특성이 변화하는 소자이다. 따라서 다이오드의 전압 V_D 의 변화에 따라 SPICE 등가회로 모델이 달라지므로 우선 다이오드 전압을 먼저 구해야 한다 [9].

그림 6은 BAT 62-02W의 데이터시트에 나온 전류-전압 특성곡선이다. $T_A = 25[^\circ\text{C}]$ 일 때, 다이오드 전압은 0.1[V]에서 최대 한계 전압인 1[V]까지 변하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 그림 5에서 0.1[V]인 지점을 찾아서 그 때의 주파수 영역에 대해서 모델링 하고자 한다.

그림 5에서 주파수 변화에 따른 다이오드 전압의 변화를 0부터 5[GHz]까지 보였다. 따라서 한 지점을 지정해서 그때의 다이오드 전압을 이용해서 모델링하였다. 그리고 그림 7은 Infineon사에서 제공한 데이터에서의 BAT 62-02W 다이오드의 S_{11} 과 SPICE 등가회로 모델을 통해서 구한 S_{11} 을 600[MHz]에서 700[MHz] 범위에서 비교한 것이다. 여기서 Ref는 제조사에서 제공받은 데이터이고 Spice는 SPICE 모

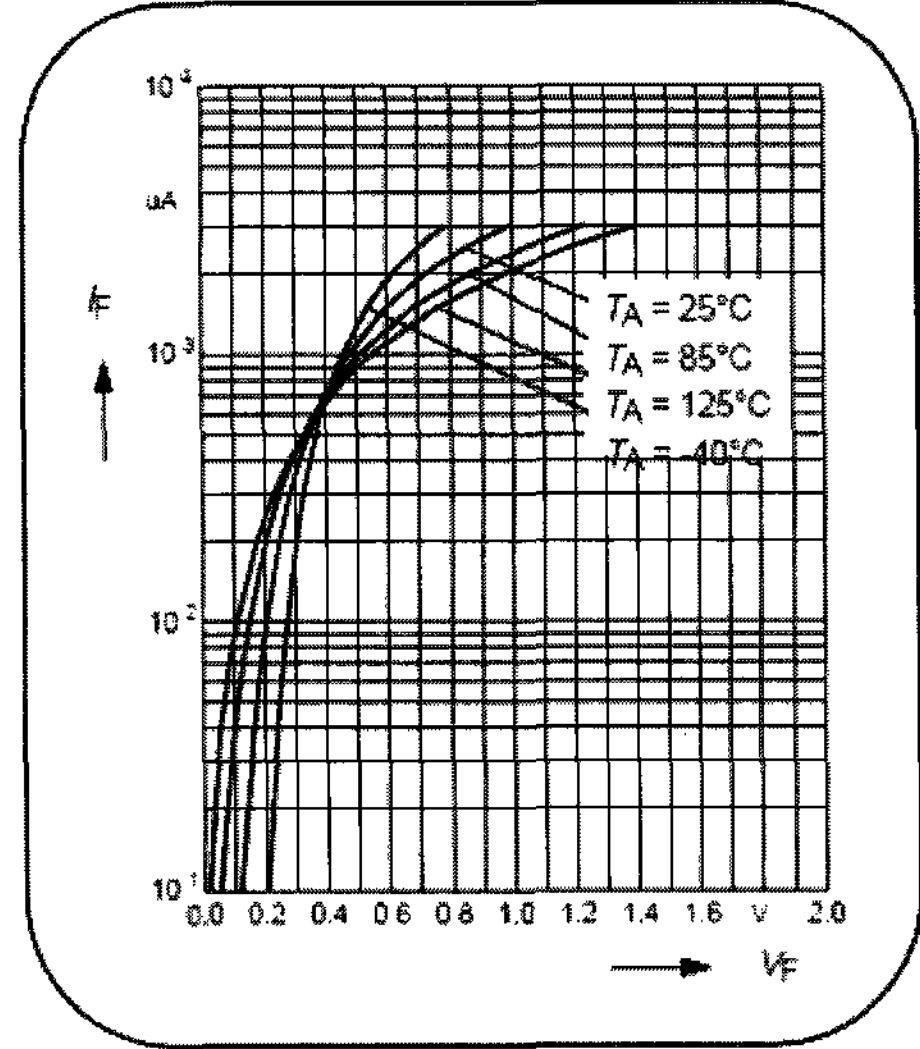


그림 6 BAT62-02W의 전류-전압 특성 곡선

Fig. 6 I-V characteristic curve of BAT62-02W

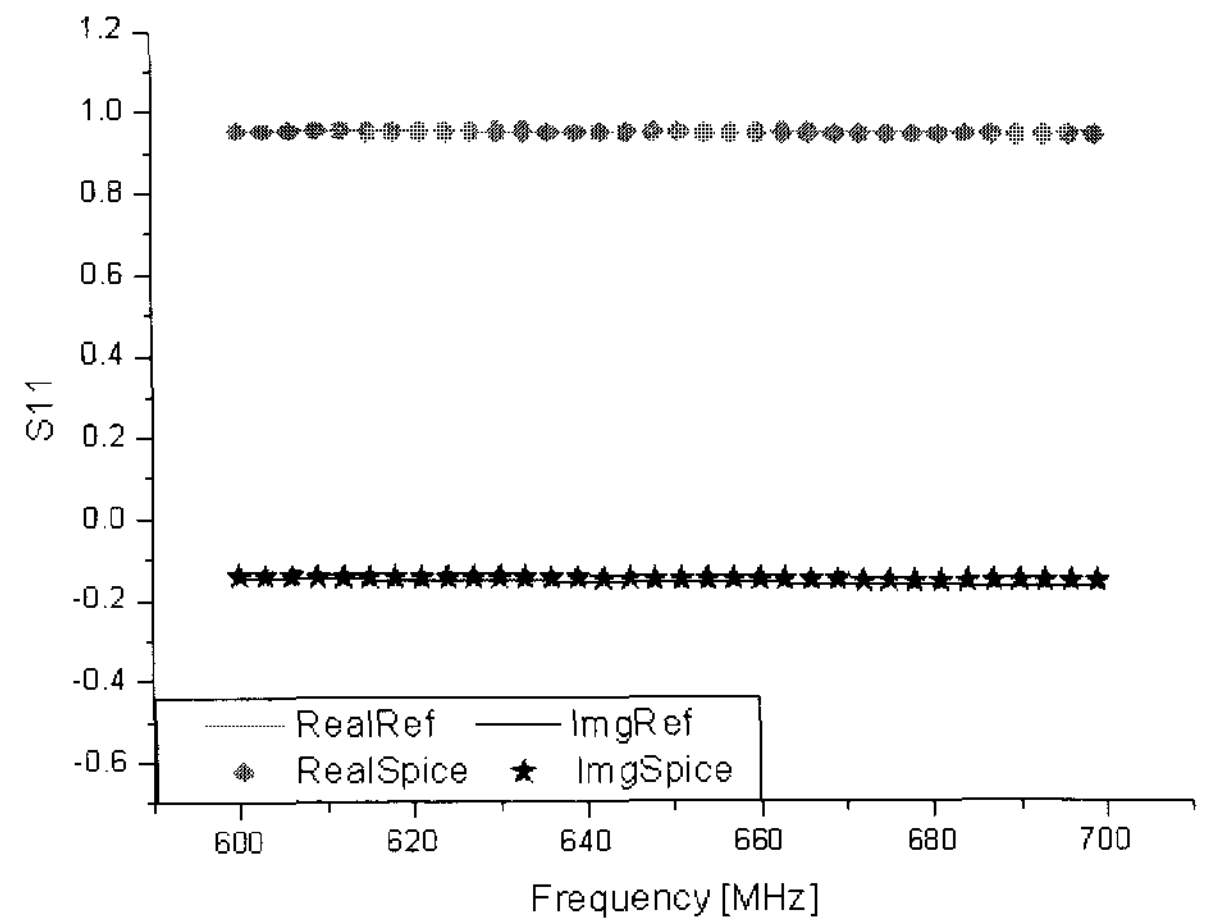


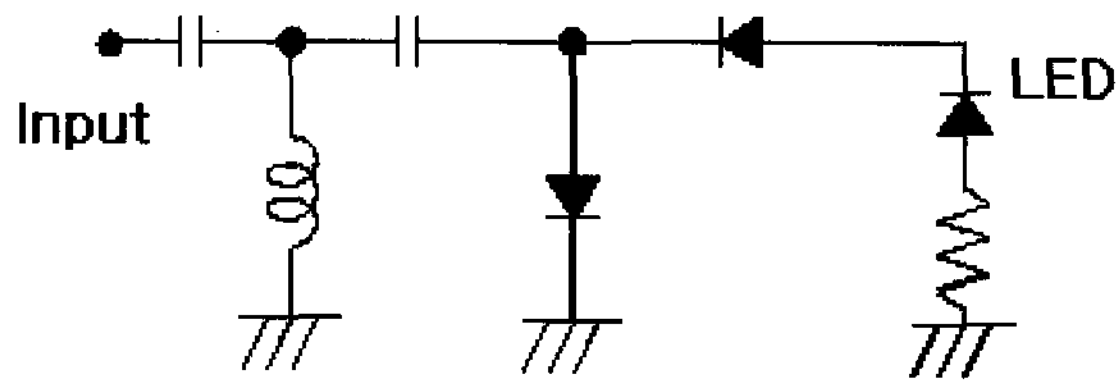
그림 7 제조사에서 제공한 BAT 62-02W의 S11과 SPICE 등가회로 모델을 통해서 얻은 S11의 비교

Fig. 7 Comparison of BAT62-02W datasheet S11 with SPICE modeling S11

델링을 통해서 얻은 결과이다. 해석 결과와 제조사의 결과는 거의 일치하는 것을 확인할 수 있고 SPICE 모델링으로 산란 특성을 구하여 EMT를 이용한 해석에 이용 가능함을 확인하였다.

4. 검파회로의 동작 특성 해석

능동소자가 포함된 간단한 회로를 이용하여 EMT의 해석의 정확성을 확인하였다. 능동소자로 다이오드를 포함한 회로 중 RF신호를 검출하는데 쓰이는 검파회로로 선정하였다. 그리고 회로의 출력을 통해 회로가 동작하고 있음을 확인하기 위하여 출력에는 LED를 연결하였으며 다이오드로는



(a) 회로도



(b) 실제 제작된 회로

그림 8 Schottky barrier diode를 이용한 LED 검파회로 회로
Fig. 8 RF detector circuit using Schottky barrier diodes

Schottky barrier diode를 사용하여 고주파에서 좋은 정류 특성을 이용하였다. 그림 8과 같이 검파회로의 회로도를 구성하였다[10]. 그리고 이 회로도를 이용하여 그림 8(b)와 같이 회로를 제작하여 동작을 확인하기 위해 신호를 직접 회로에 인가하고 LED의 점등을 확인하였다. 동작 주파수로 맞춘 3.45[GHz]에서 가장 밝은 불빛을 내었으며 일반 실내 조명에서 8[dBm]의 파워가 들어갔을 때부터 LED의 점등을 확인하였다.

EMT 해석을 위하여 그림 9와 같이 topology diagram으로 표현하였다. 첫 번째 junction인 J1은 입력포트를 나타내며 J2, J4, J6은 입력단의 매칭을 위한 수동소자를 나타낸다. 그리고 J3과 J5는 회로 기판 상의 시그널 라인의 산란 계수를 해석하여 이용하였다. 다이오드와 LED에 대해서 J7 junction 하나로 나타내었다. LED의 정확한 산란계수에 관한 정보가 없었기 때문에 실제 산란 계수 측정을 통해 구하였고 다이오드는 앞의 능동소자의 해석 방법을 적용하여 하나의 equivalent junction으로 표현하였다.

그리고 이 다이어그램을 바탕으로 scattering supermatrix, propagation supermatrix와 supervector를 구성하여 그림 10에 나타내었다. scattering supermatrix의 경우 각 칸에 들어간 junction의 산란계수를 이용하여 구성되었다. Tube의 정보를 나타내는 propagation supermatrix의 경우 해당 tube의 전파 상수를 입력하여 사용하였다 소스는 T1을 통해 들어가는 것으로 보고 W_{s1} 과 W_{s2} 를 인가하였다.

위에서 구한 행렬들을 바탕으로 BLT 방정식에 대입하여 검파회로를 해석한 결과는 그림 11과 같다. 해석 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였을 때 1~4[GHz]에서는 0.3[V] 이내의 차이를 보이며 둘의 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 그러나 4[GHz]가 넘어가면 두 결과의 차이가 약 0.5[V]이상 나는 것을 볼 수 있다. 고주파로 갈수록 BLT 방정식의

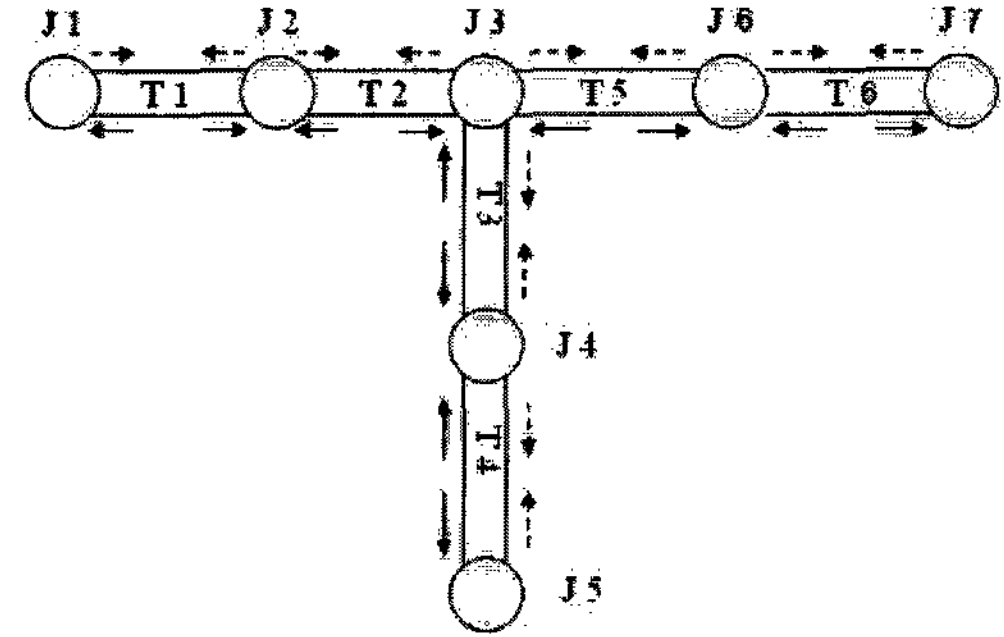


그림 9 검파회로의 topology diagram
Fig. 9 Topology diagram of detector circuit

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10	w11	w12
w1	0	J1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w2	J2	0	0	J2	0	0	0	0	0	0	0	0
w3	J2	0	0	J2	0	0	0	0	0	0	0	0
w4	0	0	J3	0	0	J3	0	0	0	J3	0	0
w5	0	0	J3	0	0	J3	0	0	0	J3	0	0
w6	0	0	0	0	J4	0	0	J4	0	0	0	0
w7	0	0	0	0	J4	0	0	J4	0	0	0	0
w8	0	0	0	0	0	0	J5	0	0	0	0	0
w9	0	0	J3	0	0	J3	0	0	0	J3	0	0
w10	0	0	0	0	0	0	0	0	J6	0	0	J6
w11	0	0	0	0	0	0	0	0	J6	0	0	J6
w12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	J7	0

(a) Scattering supermatrix

	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10	w11	w12
w1	T1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w2	0	T1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w3	0	0	T2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
w4	0	0	0	T2	0	0	0	0	0	0	0	0
w5	0	0	0	0	T3	0	0	0	0	0	0	0
w6	0	0	0	0	0	T3	0	0	0	0	0	0
w7	0	0	0	0	0	0	T4	0	0	0	0	0
w8	0	0	0	0	0	0	0	T4	0	0	0	0
w9	0	0	0	0	0	0	0	0	T5	0	0	0
w10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T5	0	0
w11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T6	0
w12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	T6

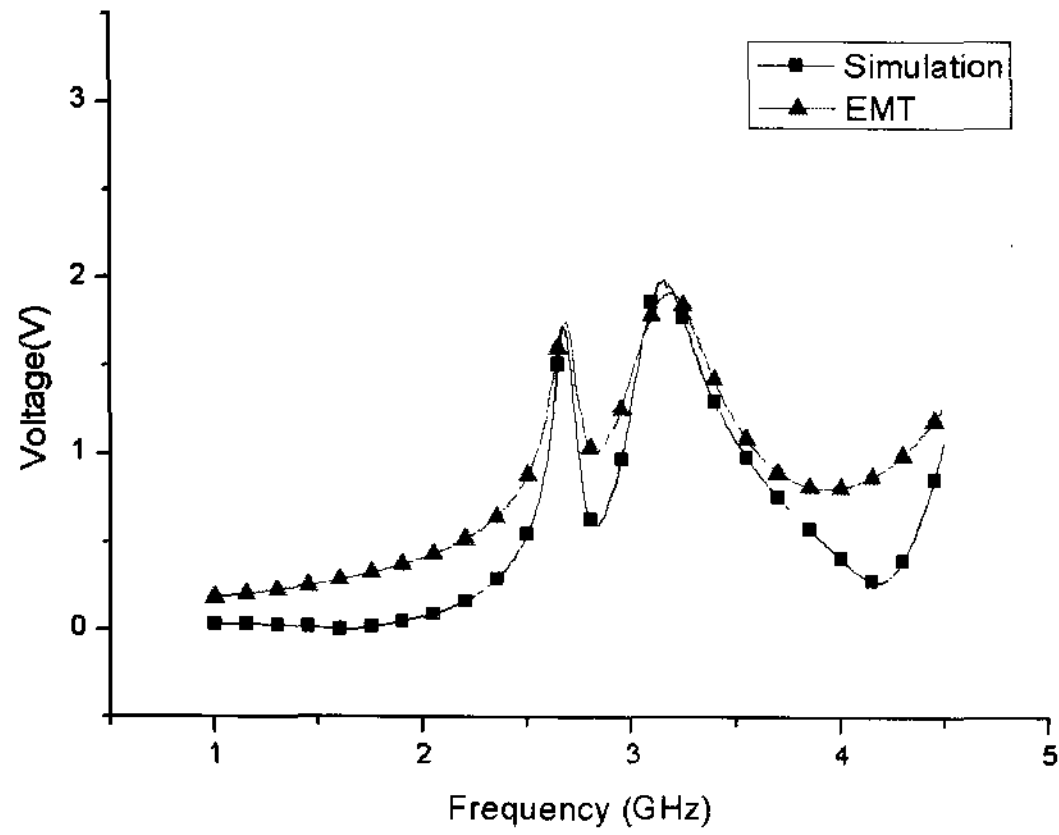
(b) Propagation supermatrix

W_{s1}
W_{s2}
0
0
0
0
0
0
0
0
0

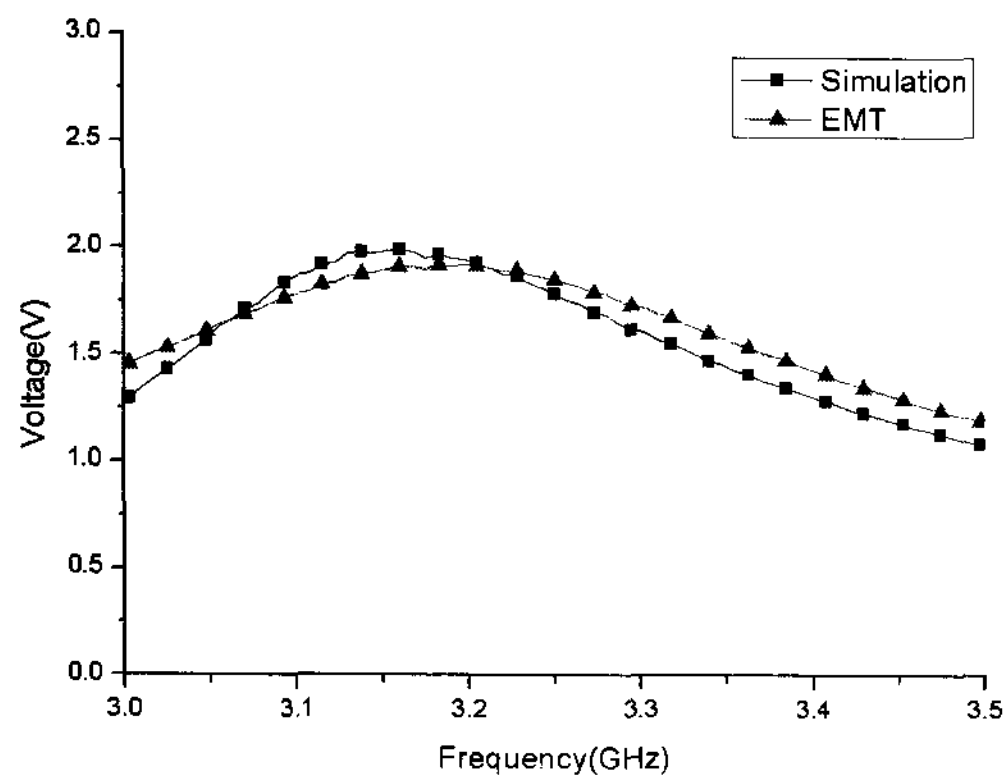
(c) supervector

그림 10 검파회로의 (a)scattering supermatrix (b)propagation supermatrix (c)supervector

Fig. 10 (a)Scattering supermatrix, (b)propagation supermatrix, and (c)supervector of detector circuit



(a) 1 ~ 4.5[GHz]



(b) 3 ~ 3.5[GHz]

그림 11 검파회로의 EMT 해석 결과와 시뮬레이션 툴을 이용한 결과 비교

Fig. 11 Comparison of EMT analysis result with simulation tool result of detector circuit

해석과 시뮬레이션 툴의 해석에 쓰이는 계수 값이 달라져서 나타나는 결과이다.

이 해석에서 중시해서 보아야 할 주파수는 검파회로가 동작하는 3~3.5[GHz] 영역이다. 그림 11(b)는 그림 11(a)의 이 영역 주파수를 확대하여 본 것이다. 약 0.1[V] 정도의 차이를 보이며 EMT를 이용한 해석과 시뮬레이션 툴의 해석이 잘 맞고 있음을 확인할 수 있다.

해석의 검증을 위해 검파회로에 직접 해석회로의 입력단과 같은 전력을 가진 신호를 넣고 LED에 걸리는 출력전압을 측정하였다. 주파수에 따른 출력전압의 변화는 그림 12과 같이 나왔다. 검파회로의 동작 주파수인 3.3[GHz]에 근접한 지점을 시뮬레이션 툴과 EMT 해석, 실험을 비교하여 표 1에 나타내었다. EMT 해석 결과와 시뮬레이션 결과는 0.08[V]로 차이를 보이며 실험 결과와는 0.01[V]로 더 작은 차이를 보이지만 오차 범위를 5[%]인 0.08[V]로 본다면 세 가지 결과 모두 오차 범위 이내에 있다. 즉, BLT 방정식을 이용한 해석이 시뮬레이션 툴과 실제 제작된 회로의 측정을 5[%] 범위 내에서 해석하고 있음을 확인했다. 그림 11과 그림 12의 그래프 모양을 비교하여본다면 3~3.5[GHz]에서는 둘 다 피크를 가지지만 해석은 4[GHz]가 넘어가면 출력전압이 높아지는 반면 실험에서는 4[GHz] 이후로 0[V]로 가까워진다. 이 점은 사용된 다이오드의 특성 때문이다. 매칭단의

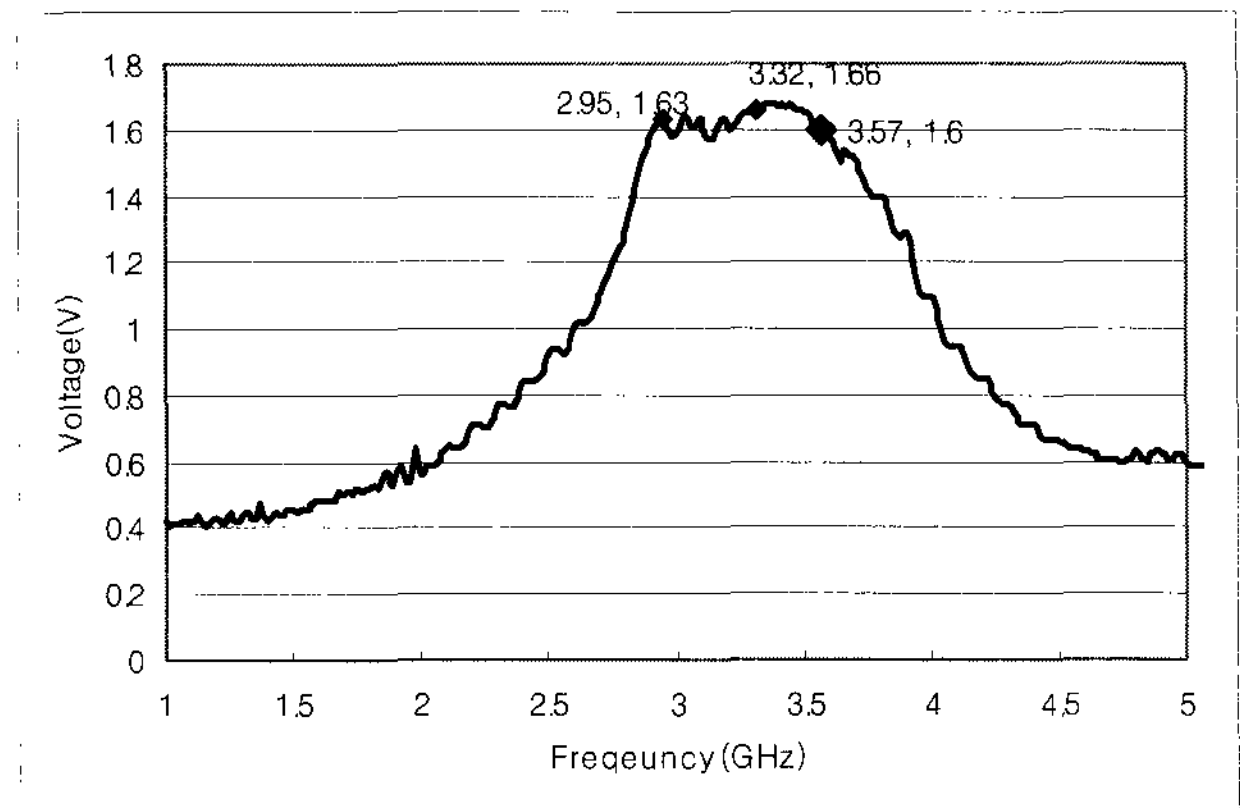


그림 12 검파회로에 신호를 직접 인가하여 측정한 LED의 출력 전압

Fig. 12 Measured LED output voltage from direct input power

표 1 주파수 3.32[GHz]에서 다이오드 앞의 전압 비교

Table 1 Diode voltage at 3.32[GHz]

	EMT	Simulation	실험
Voltage(V)	1.65	1.53	1.66

주파수 특성은 4[GHz]보다 높은 고주파에서도 잘 동작하게끔 설계되었지만 실제 실험에서는 고주파 쪽으로 갈수록 다이오드가 정류할 수 있는 한계 주파수를 넘어가서 LED에 DC 전압이 나타나지 않고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 능동소자를 포함한 회로를 EMT를 이용하여 해석하는 방법을 제시하였다. 우선 능동소자로 다이오드를 선정하여 EMT를 이용한 해석 방법을 제시하고 실제의 데이터와 비교를 통해 정확성을 확인하였다. 다음으로 다이오드를 이용한 검파회로에 입력단을 통해 신호를 인가하였을 때의 동작을 해석하고 시뮬레이션 툴과 실험을 통해 검증해보았다. 특히 검파회로의 동작 주파수에서의 정확도를 확인하였다. 이를 통해 EMT를 이용한 회로의 동작 특성 해석이 실재를 잘 모의할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 향후 EMT의 장점을 살려 능동소자가 들어간 좀 더 복잡한 시스템에서도 효과적으로 적용시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] F.M. Tesche, and C.M. Butler, "On the Addition of EM Field Propagation and Coupling Effects in the BLT Equation," March 2003.
- [2] F.M. Tesche, J.M. Keen and C.M. Butler, "Example of the user of the BLT equation for EM field propagation and coupling calculation," Radio Modern Science, 2005.

- [3] C.E. Baum, "How to Think About EMP Interaction," Proceedings of the 1974 Spring FULMEN Meeting, Kirtland AFB, April 1974.
- [4] Yoon-Mi Park, Jung-Yub Lee, Sehoon Hwang, Hyun-Kyo Jung, Young-Seek Chung and Hyeong-Seok Kim, "Analysis of Printed Circuit Boards Based on Electromagnetic Topology", Journal of Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 15, No.3, 2007.
- [5] Zhou Dong-fang, Lin Jing-yu, Ren Jing-pu, et al., "The Application of Electromagnetic Topology in the Analysis of HPM Effects On System," Antennas, Propagation and EM Theory, 2003. Proceedings. 2003 6th International Symposium on. 28 Oct. - 1 Nov. 2003, pp.630-633.
- [6] Heiko Haase, Torsten Steinmetz, and Nitsch Fellow, "New Propagation Models for Electromagnetic Waves Along Uniform and Nonuniform Cables," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 46, no. 3, pp. 345-351, 2004.
- [7] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Jonh Wiley & Sons, Inc. 2nd Ed., 1998.
- [8] Yoon-Mi Park, Ohwook Kwon, Jung-Yub Lee, Hyun-Kyo Jung, Changyul Cheon, Jin Woo Shin, and Woo Sang Lee, "Analysis of Printed Circuit Boards Including Active Components Based on Electromagnetic Topology", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 2007.
- [9] Adel S. Sedra, K. Smith, Microelectronic circuits, Oxford University press, New York, 1998.
- [10] Yuichi Ichikawa, Microwave Lecture, <http://www.rfdh.com>

저 자 소 개



권 오 욱 (權 五 旭)
 2002년 서울대학교 전기공학부 졸업 (공학사). 2008년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업 (공학석사.)
 Tel : 02-880-7262
 Fax : 02-878-1452
 E-mail : kwonouk@hotmail.com



박 윤 미 (朴 允 美)
 2004년 충남대학교 정보통신공학부 졸업 (공학사). 2004년~현재 동대학원 전기컴퓨터공학부 석박통합과정 재학 중
 Tel : 02-880-7262
 Fax : 02-878-1452
 E-mail : iamyum00@snu.ac.kr



정 용 식 (鄭 容 植)
 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년~2006년 명지대학교 통신공학과 조교수, 2006년 ~현재 광운대학교 전파공학과 조교수
 Tel : 02-940-5184
 E-mail : yschung@kw.ac.kr



천 창 율 (千 昌 律)
 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1992년 미국 University of Michigan, Ann arbor 졸업 (공학박사). 1992년~1995년 강원대학교 전기공학과 조교수, 1995년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수
 Tel : 02-2210-2442
 Fax : 02-2249-6802
 E-mail : changyul@uos.ac.kr



정 현 교 (鄭 炫 敎)
 1979년 서울대 전기공학과 졸업(공학사). 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1994년 강원대학교 전기공학과 조교수/부교수, 1994년~현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 정교수
 Tel : 02-880-7242
 Fax : 02-878-1452
 E-mail : hkjung@snu.ac.kr