

# 역산 기법을 이용한 EMI Source의 모델링

Modeling of EMI Source Using Inverse Techniques

임창환, 정현교 · 서울대학교 전기공학부

김형석 · 중앙대학교 전자전기공학부, 이정해 · 홍익대학교 전파통신공학부

Chang-Hwan Im, Hyun-Kyo Jung · Seoul National University

Hyeong-Seok Kim · Chungang University, Jeong-Hae Lee · Hongik University

## ABSTRACT

In this paper, a technique to estimate EMI source distribution on a digital circuit board is introduced. A sensitivity analysis method is applied to reconstruct the source distribution from measured electric field data. Results from a single-layer measurement and a double-layer measurement are compared. It will be shown, from the simulation, that the use of sensitivity analysis for the EMI source reconstruction problem can be a very promising technique.

## I. 서론

일반적으로 PCB나 PC의 메인 보드 등 디지털 회로에서 유도되는 EMI source는 수치 해석적인 관점에서 볼 때, 소자 하나 하나를 정확하게 모델링하고 해석하는 것이 거의 불가능하다. 이러한 경우의 EMI source는 회로 기판 표면에서의 등가적인 분포로 나타내어야 한다

[1], [2]. 본 논문에서는 등가적인 source 분포를 구하기 위해서 민감도법(sensitivity analysis method)에 기초한 역산 기법을 적용하였다 [3]-[5]. 민감도법에 의한 역산 기법은 물질 값이나 전류원 등의 복원 문제에 많이 사용되어 왔으나 EMI source의 역산 문제에서의 적용은 처음으로 시도된 것이다. 민감도법에 의한 역산은 Singular Value Decomposition(SVD) 법 등과 같은 직접법에 비해서 많은 양의 설계 변수를 효과적으로 처리할 수 있으며 수렴의 속도도 매우 빠른 장점이 있다. 본 논문에서는 source 평면에서 각 위치 별로 설계 변수를 설정하여 역산을 수행하였으며 변수의 값을 갱신하기 위해서 최대 경사도법(Steepest Decent Method)을 적용하였다. 기존의 논문에서 제시되었던 단일 레이어(single-layer) 측정법 [1] 이외에 연속되는 2개의 측정 면을 이용하는 이중 레이어(double-layer) 측정을 시도함으로써 보다 향상된 복원 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 제시된 방법을 여러 가지의 소스 형태에 적용하여 타당성을 검증하였다.

## II. 문제의 개요 및 역산 기법

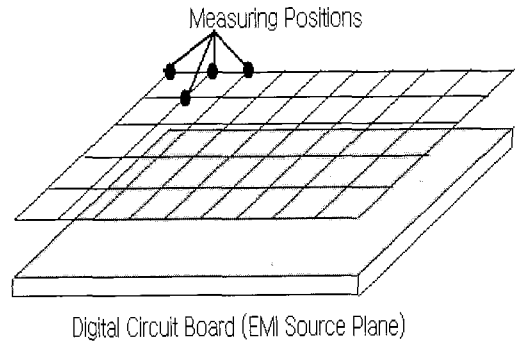
### 1. 문제의 개요

[그림 1]은 EMI Source 역산 문제의 개념을 도식적으로 나타내고 있다. 그림과 같이 디지털 회로의 표면에 다양한 소자들에 의한 전계 source가 형성되면 이 source에 의한 전계의 값을 회로 표면 위에서의 격자 형태의 전계 프로브를 이용하여 측정한다. 물론 격자 형태의 센서를 실제로 제작하는 것은 많은 돈과 노력을 요하는 일이기 때문에 실제 실험은 프로브의 위치를 옮겨가면서 측정하는 형식이 되어야 한다. 문제는 센서에서 측정된 전계의 값들을 이용하여 source 평면에서의 전계의 값을 계산하고 나아가 공간 전체의 전계 분포를 예측하는 것이다.

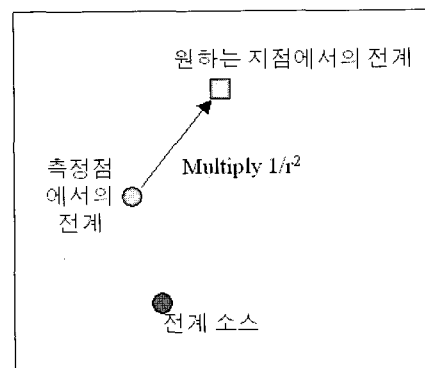
우선 문제를 단순화시키기 위하여 측정 지점에서 측정하는 전계의 값이 수직 성분만이 측정 가능하다고 가정하자. 그러면 전계의 source는 회로 기판에 역시 수직한 성분만이 존재하며 전계 source의 값을  $S$ 라는 값으로 정의하면 임의의 위치에서의 전계 값은 source의 값  $S$ 에  $1/r^2$ 을 곱한 값으로 계산할 수 있다 [1].

개념을 보다 쉽게 이해하기 위해서 [그림 2]를 도입하였다. [그림 2](a)와 같이 측정 지점에서의 전계 값을 직접 이용하여 원하는 지점의 전계를 계산하는 경우와 [그림 2](b)와 같이 실제 source의 전계 값을 구하고 그 지점에서부터의 전계 값을 계산하는 경우를 비교해 보면 EMI source를 역산을 통해 구해야 하는 이유가 자명해진다. [그림 2](a), (b)에서 공통적으로 전계 source에서 원하는 지점까지의 거리는

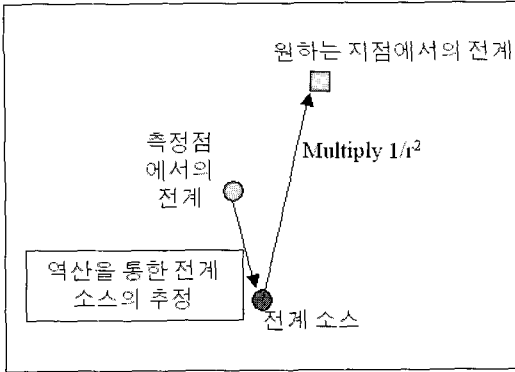
3[m]이고 전계 source와 측정점, 측정점과 원하는 지점 사이의 거리는 모두 2[m]라고 가정하자. 만약 전계 source의 전계 값이 1이라고 가정하면 측정점에서 측정되는 전계의 값은 1/4가 되고 원하는 지점에서의 실제 전계 값은 1/9가 된다. 한편, 측정점에서의 전계 값을 이용하여 원하는 지점에서의 전계 값을 계산하는 경우 구해지는 전계의 값은 1/16이 되어 실제의 값과 달라진다. 이와 같은 오류는 흔히 범하기 쉬운 것으로서 EMI source 역산 문제의 필요성을 단적으로 보여주는 예이다.



[그림 1] EMI Source 역산 문제의 개요



(a) 잘못된 전계 계산법의 예



(b) 올바른 전계 계산 방법

[그림 2] EMI source 역산의 필요성

## 2. 역산 기법 - 민감도법

역산 문제를 분류하는 방법에는 여러 가지가 있으나 주로 over-determined, determined, under-determined의 세 가지 부류로 분류하는 것이 보통이다. over-determined한 문제는 미지수의 개수보다 센서의 수(측정 데이터)가 더 많은 경우를 의미하고 under-determined한 문제는 이와 반대로 미지수의 개수가 센서의 수보다 더 많은 경우를 의미한다. 물론, determined 문제는 양자의 수가 같은 경우를 의미한다. 본 논문에서 고려한 문제는 기본적으로 under-determined한 성질을 가진다. 즉 센서의 수 보다 source를 복원하는 지점들의 수가 훨씬 더 많은 문제이다. 이와 같은 문제를 풀기 위한 다양한 역산 기법들이 제안되어 왔는데 가장 간단한 방법으로는 SVD를 사용하는 직접적인 해법이 있다 [1]. 하지만 본 논문에서는 source 평면에 약 10000개 이상의 설계 변수가 존재하기 때문에 직접법 계통의 방법을 적용할 경우 거의 해법이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 간접법적인 역산 기법

중 대표적인 방법인 민감도법을 적용하였다. 민감도법을 이용한 역산에서의 목적함수는 다음과 같이 정의하였다.

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_s} (E_i^c - E_i^o)^2 \quad (1)$$

이 때,  $N_s$ 는 센서의 수(위치),  $E_i^c$ 는 현재 스텝에서의 계산에 의한 전계 값,  $E_i^o$ 는 측정된 전계 값을 나타낸다. 1/2는 이후 수식 전개에서의 편리함을 위해서 도입된 계수이다. 각 설계변수에 대한 민감도의 값은 다음 식에 의해서 계산된다.

$$\frac{dF}{dS_k} = \sum_{i=1}^{N_s} (E_i^c - E_i^o) \frac{dE_i^c}{dS_k} \quad (2)$$

여기서  $S_k$ 는  $k$ 번 째의 설계변수 값( $k$ 번 째 위치에서의 source 값)을 나타낸다. 이 때, (3)의 관계에 의해서 최종 민감도 식은 식 (4)와 같게 된다.

$$E_i^c = \sum_{j=1}^{N_s} \frac{1}{r_{ij}^2} \cdot S_j \quad (3)$$

$$\frac{dF}{dS_k} = \sum_{i=1}^{N_s} (E_i^c - E_i^o) \frac{1}{r_{ik}^2} \quad (4)$$

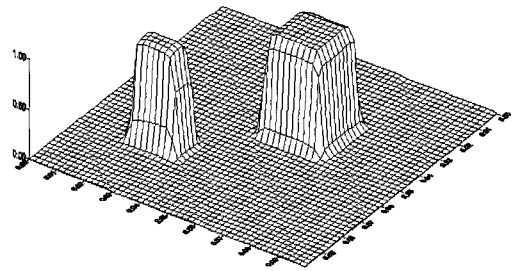
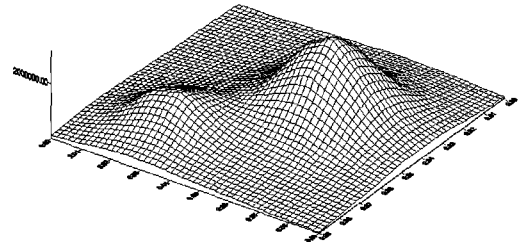
이 때,  $r_{ij}$ 는  $i$ 번 째 센서 위치와  $j$ 번 째 source 위치와의 거리를 나타낸다. 이와 같이 각 설계변수마다 민감도가 계산되면 식 (5)에서 제시된 최대 경사도법 (Steepest Decent Method)을 이용하여 각 설계 변수의 값을 갱신하게 된다.

$$S_k^{(l+1)} = S_k^{(l)} - \alpha \frac{F}{\|dF/dS\|^2} \frac{dF}{dS_k} \quad (5)$$

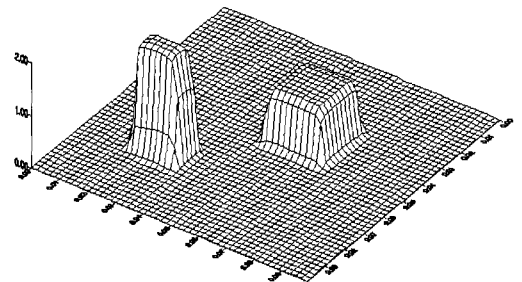
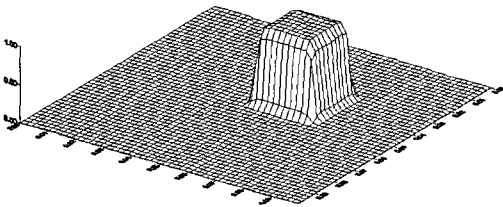
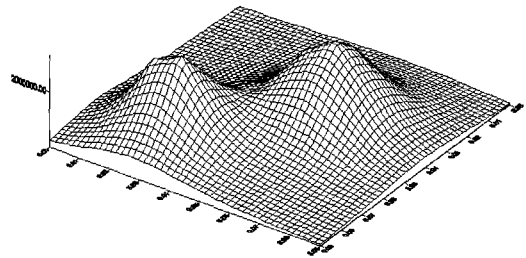
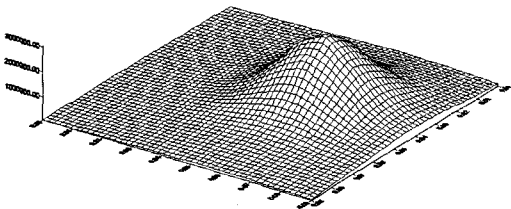
이 때, 위 첨자 ( $l$ ), ( $l+1$ )은 현재의 반복 계산 회수를 나타내며  $\|e\|$ 은 모든 변수의 민감도 값에 대한 norm을 나타낸다.  $\alpha$ 는 감속 계수 (relaxation factor)로서 지나친 변화로 인해 해가 발산하는 것을 방지해 준다. 본 논문에서는 모든 경우에 대해 이 값을 0.3으로 고정시켰다.

### 3. 역산을 위한 데이터의 구축

이렇게도 본 논문에서 제시한 방법에 대한 실험 환경은 아직 구축되지 못한 실정이다. 따라서 측정 시스템을 모사하기 위해서 5가지의 source 분포를 가정하고 이에 대한 forward solution을 풀어서 가상 실험 데이터를 만들었다. 실제 실험과 최대한 유사한 상황을 가정하기 위해서 forward 데이터에 최대 5%의 가우시안 노이즈를 첨가하였다. [그림 3]은 5가지의 source 분포 및 단일 레이어(single-layer) 측정을 한 경우 센서 평면에서의 전계 분포를 나타내고 있다.

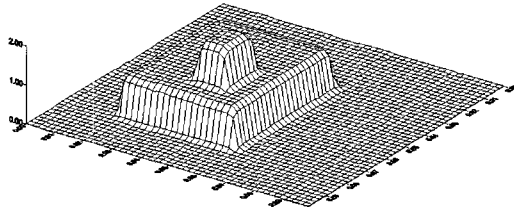
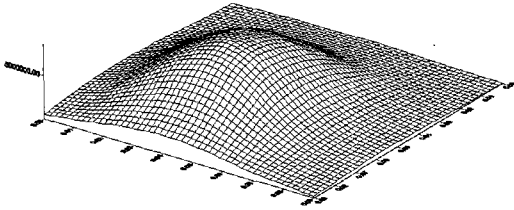


(b) 타입 2 - 최대값 1인 2개의 peak

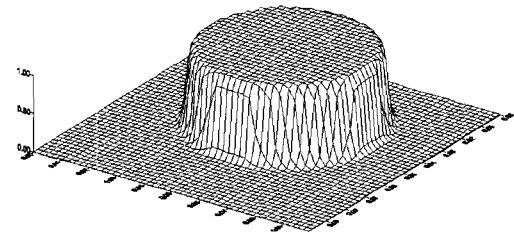
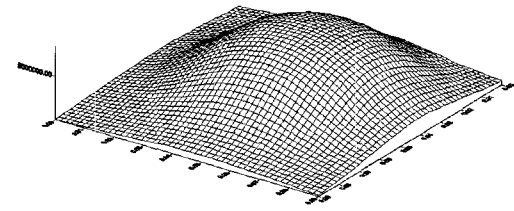


(a) 타입 1 - 최대값 1인 1개의 peak

(c) 타입 3 - 최대값 1인 peak와 최대값 2인 peak



(d) 타입 4 - 최대값 1인 소스 내에 최대값 2인 소스가 들어 있는 형태



(e) 타입 5 - 최대값 1인 일반적인 형태 - 원형

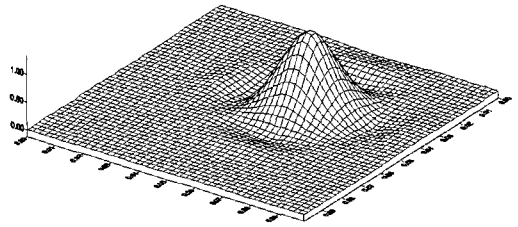
[그림 3] 각 source 타입 별 센서 평면에서의 측정값(obtained by forward solving) 및 소스 평면에서의 원래 소스의 분포

### III. 결과 및 토의

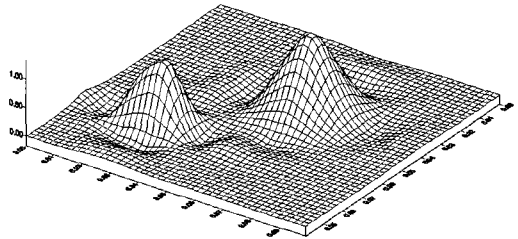
#### 1. Single-layer 데이터를 이용한 복원 결과

[그림 4]는 표면에서 10mm 떨어진 위치에

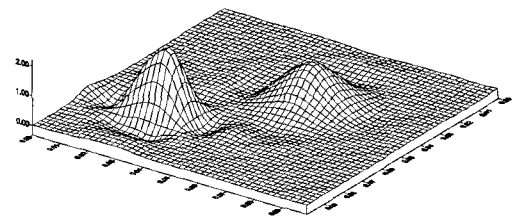
있는  $10 \times 10$ (100개)의 센서 위치에서의 가상 측정치를 이용하여 source 분포를 역산한 결과를 나타낸다. 모든 결과는 800번의 반복 계산 이후에 얻어진 것이며 소스 평면에서는  $100 \times 100$  (10000개)의 설계변수를 가정하였다.



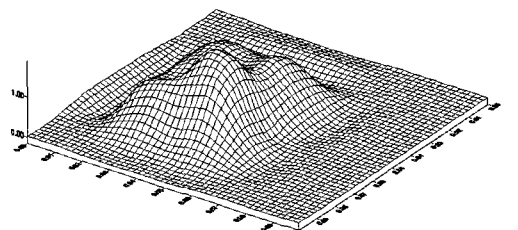
(a) 타입 1의 역산 결과, 최대값 1.05



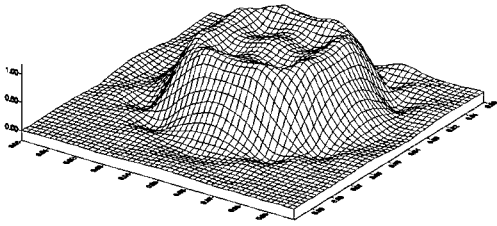
(b) 타입 2의 역산 결과, 최대값 1.07



(c) 타입 3의 역산 결과, 최대값 2.11



(d) 타입 4의 역산 결과, 최대값 1.97



(e) 타입 5의 역산 결과, 최대값 1.13

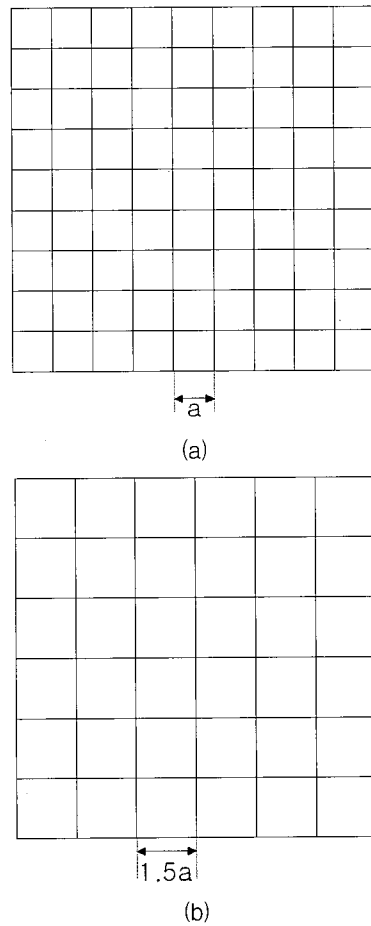
[그림 4] 여러 타입에 대한 역산 결과 (single-layered 센서를 이용한 경우)

앞선 결과들에서 볼 수 있듯이 아주 정확한 소스의 형태까지 복원하는 것은 주어진 데이터 만으로는 힘들지만 소스의 위치 및 최대치 등은 거의 정확하게 복원함을 확인할 수 있다.

## 2. Double-layer 데이터를 이용한 복원 결과

앞 절에서 보인 단일 레이어의 결과와 비교를 위해서 이중 레이어(double-layer)로 된 센서를 사용하였다. 각 층은  $7 \times 7$  (49개)의 센서를 가지고 있으며 (총 개수는 98개) 두 레이어 사이의 거리는 5mm이다. 센서가 커버하는 x-y 평면 상의 면적은 단일 레이어와 이중 레이어가 동일하다. 즉, 같은 레이어 내에서 이웃하는 센서 간의 거리는 이중 레이어가 단일 레이어보다 1.5배 더 커지게 된다. 이해를 돕기 위하여 단일 레이어와 이중 레이어의 센서 배치도를 [그림 5]에 나타내었다. forward 데이터 구성 등 계산에 있어 관련된 조건들은 모두 단일 레이어의 경우와 동일하게 부여하였다. 이 경우의 결과는 육안으로는 그 정확도를 비교하기가 힘이 들기 때문에 <표 1>에서와 같이 800번 반복 수행 이후의 목적함수 값을 비교하여 보았다. 목적함수는 식 (1)과 같이 정의되며 이 값이 작아질수록 더 정확한 해에 근접하는 것

이다. 표로부터 알 수 있듯이 거의 같은 개수의 센서를 사용하는 경우라도 800회 반복 계산 수행 후의 목적함수 값을 비교하여 보면 2층의 센서를 사용하는 경우가 더 작은 값을 가짐을 확인할 수 있다. 즉, 이중 레이어를 이용하는 경우가 단일 레이어를 사용하는 경우에 비해서 더 정확도가 향상된다는 결론을 내릴 수 있다.



[그림 5] 단일 레이어(a)와 이중 레이어(b)의 센서 배치 비교. 격자의 만나는 점들 위치에 센서가 놓여진다. 단일 레이어 센서는 10 by 10, 이중 레이어는 7 by 7 센서가 2층으로 놓여진다.

<표 1> 단층 센서와 2층 센서의 결과 비교  
(800회 반복 계산 수행 후의 목적함수)

	타입 1	타입 2	타입 3	타입 4	타입 5
초기치	2.91E+13	4.11E+13	6.33E+13	5.18E+14	7.10E+14
1-layer	4.94E+07	6.76E+07	5.89E+08	1.29E+08	1.75E+08
2-layer	4.53E+06	7.47E+06	4.77E+07	4.91E+06	1.28E+07

이와 같이 구해진 source의 분포를 이용하면 원하는 지점에서의 전계의 값을 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있게 된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 민감도법을 이용하여 측정된 전계 값을 이용하여 EMI source 분포의 역산을 수행하였다. 그 결과 비교적 적은 센서의 데이터만으로도 100배가 넘는 설계변수를 가진 source의 위치 및 최대값을 비교적 정확히 복원하는데 성공하였다. 또한 단층으로 이루어진 센서와 2개의 층을 가진 센서의 결과를 비교함으로써 2층 센서가 더 정확한 해를 구할 수 있음을 확인하였다. 현재 연구에서는 전계의 값이 z성분만 존재하는 것으로 가정하여 역산을 시도하였으므로 정확한 형태까지는 복원이 힘들었으나 향후 3 방향 성분을 모두 고려하는 역산을 수행할 경우 더 실제적인 복원이 가능할 것으로 여겨진다. 궁극적으로는 실제 PCB 등에 대해서 실험을 통해 본 연구에 사용된 방법의 효용성을 검증하여야 할 것이다.

#### ■참고문헌

- [1] Amane Takei, Seiji Hayano, Yosifuru Saito, "A Weighted Inverse Matrix Approach to Searching for the Electric Field Sources," *IEEE transactions on Magnetics*, Vol. 36, No.4, pp. 1031-1034, July., 2000.
- [2] Christos Christopoulos, *Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility*, CRC Press, 1995.
- [3] Jung-Kyun Cho, seung-Bae Park, Chang-Hwan Lee, Hyun-Kyo Jung, Song-Yop Hahn, Chang-Seop Koh, "Multiresolution Analysis for Permeability Reconstruction Using Wavelet", *IEEE transactions on Magnetics.*, Vol. 35, No.5, pp. 3757-3759, Sept., 1999.
- [4] R. Sikora, Z. Giza, F. Filipowicz, J. Sikora, "The Bell Function Approximation of Material Coefficients Distribution in the Electrical Impedance Tomography," *IEEE transactions on Magnetics*, Vol. 36, No.4, pp. 1023-1026, July., 2000.
- [5] Chang-Hwan Im, Kwan-Ok An, Hyun-Kyo Jung, Yong-Ho Lee, Hyuk-Chan Kwon, "MEG Source Reconstruction Using Sensitivity Analysis," Proceedings of biennial international conference on Biomagnetism 2002 (Biomag 2002), Jena, Germany, August, 2002.

저자 소개



**임 창 환**

1999년 서울대 전기공학부 졸업.  
2001년 동 대학원 전기공학부 졸업  
(석사)  
2001년 ~ 현재 동 대학원 전기공  
학부 박사과정

Tel. 02-880-7262

E-mail : ichich2@snu.ac.kr



**김 형 석**

1985년 서울대학교 공대 전기공학  
과 졸업  
1987년 동 대학원 석사과정 졸업  
(석사)  
1990년 동 대학원 박사과정 졸업  
(박사)  
1990-2002년 순천향대학교 전기전자  
공학부 부교수. 현재 중앙대  
학교 전자전기공학부 부교수

Tel. 02-820-5287

E-mail : kimcaf2@cau.ac.kr



**정 현 교**

1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업  
1984년 동 대학원 전기공학과 졸업  
(공학박)  
1987년-1989년 뉴욕 Polytechnic  
Univ. 객원 교수  
1984년-1993년 강원대 전기공학과  
부교수. 현재 서울대 전기  
공학부 교수

Tel. 02-880-7242

E-mail : hkjung@snu.ac.kr



**이 정 해**

1985년 서울 대학교 공과 대학 전  
기 공학과 (학사)  
1988년 서울 대학교 대학원 전기  
공학과 (석사)  
1996년 미국 U.C.L.A 대학원 E.E.  
Dept (박사)  
1993.4-1996.2. 미국 General Ato  
mics (교환 연구원)  
1996.3-1996.8. 미국 U.C.L.A 대학  
원 E.E.Dept. (Post Doctor)  
현재 홍익대학교 공과대학  
전자전기공학부 조교수

Tel. 02-322-1892

E-mail : jeonglee@wow.hongik.  
ac.kr