CPU 클러스터 구축 및 3차원 공간분할 병렬 FDTD 알고리즘 구현

Construction of a CPU Cluster and Implementation of a 3-D Domain Decomposition Parallel FDTD Algorithm

박성민 · 추광욱* · 주세훈* · 박윤미* · 김기백* · 정경영

Sungmin Park · Kwang-Uk Chu* · Sachoon Ju* · Yoon-Mi Park* · Ki-Baek Kim* · Kyung-Young Jung

요 약

본 연구에서는 빠르게 전자파 해석을 수행할 수 있는 병렬 유한차분 시간영역(Finite-Difference Time-Domain: FDTD) 알고리즘을 구현하기 위하여 CPU 클러스터를 구축하였다. 병렬 FDTD 알고리즘은 단일 프로세서를 이용한 FDTD 알고리즘에 비해 해석 시간을 크게 줄일 수 있으며, 전기적으로 매우 큰 구조물에 대한 전자파 해석도 가능하다. 본 연구팀에서는 CPU 클러스터 기반의 병렬 FDTD 알고리즘에서 요구되는 프로세스 간의 통신을 위해 MPI(Message Passing Interface) 라이브러리를 이용하였으며, 3차원 공간분할을 적용하여 프로세스 간의 통신 시간을 최소화하였다. 단일 프로세서를 이용한 FDTD 알고리즘 대비 CPU 클러스터 기반의 병렬 FDTD 알고리즘의 계산속도 향상도를 기본 모드와 하이퍼 모드에서 분석하였으며, 전기적으로 매우 큰 콘크리트 구조물의 전자파 해석을 하였다.

Abstract

In this work, we construct a CPU cluster to implement a parallel finite-difference time domain(FDTD) algorithm for fast electromagnetic analyses. This parallel FDTD algorithm can reduce the computational time significantly and also analyze electrically larger structures, compared to a single FDTD counterpart. The parallel FDTD algorithm needs communication between neighboring processors, which is performed by the MPI(Message Passing Interface) library and a 3-D domain decomposition is employed to decrease the communication time between neighboring processors. Compared to a single-processor FDTD, the speed up factor of a-CPU-cluster-based parallel FDTD algorithm is investigated for the normal mode and the hypermode and finally analyze an electrically large concrete structure by the developed parallel algorithm.

Key words: FDTD, MPI, Parallel Processing, 3-D Domain Decomposition

I. 서 론

오늘날의 수치해석 기법은 과학 기술 전반에 걸쳐 중요한 역할을 하고 있다. 여러 전자파 해석 기법 중 유한차

분 시간 영역(Finite-Difference Time-Domain: FDTD)법^[1]은 한 번의 시뮬레이션으로 광대역 주파수 특성을 해석할 수 있으며, 복잡한 물질 및 구조를 쉽게 해석할 수 있기 때문에 널리 사용되고 있다^{[2]~[5]}. 하지만 해석의 규모가

「이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012R1A1A1015159).」

「본 연구는 ETRI 부설연구소 위탁과제의 연구 결과로 수행되었음.」

한양대학교 전자컴퓨터통신공학과(Department of Electronics Computer Engineering, Hanyang University)

*ETRI 부설연구소 (Attached Institute of ETRI)

• Manuscript received December 6, 2013 ; Revised March 4, 2014 ; Accepted March 5, 2014. (ID No. 20131206-09S)

• Corresponding Author: Kyung-Young Jung (e-mail: kyjung3@hanyang.ac.kr)

큰 구조일 경우, 해석에 소요되는 시간이 매우 많거나, 계산량이 많아 단일 컴퓨터의 한정된 메모리 문제로 인하여 해석이 불가능할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다중 컴퓨터 환경을 이용하는 공간 분할 병렬처리 방법이 소개되었다. FDTD 기법은 공간을 해석할 때, E 필드와 H 필드의 정보만을 주고받으며 행렬 계산을 하지 않는 양함수(explicit) 수치해석 기법이기 때문에, 행렬 계산이 필요한 음함수(implicit) 수치해석 기법인 FEM과 MOM 기법에 비하여 공간 분할 병렬처리 기법을 용이하게 적용할 수 있다. 공간 분할 병렬처리는 해석공간을 분할하여 여러 대의 컴퓨터에서 각각의 계산을 수행하고, 계산된 정보를 순차적으로 다시 취합하는 방법이며, 시스템적으로 단일 CPU만을 이용하여 해석하는 경우보다 CPU 개수와 메모리가 늘어난 것이므로 해석 공간의 크기뿐만 아니라, 해석 시간도 획기적으로 빨라질 수 있다. 이러한 CPU 클러스터를 기반으로 하여 공간 분할 병렬처리 FDTD를 이용한 크고 복잡한 구조물의 고속 전자파 특성 해석 연구가 국내에서는 거의 이루어지고 있지 않으나, 국외에서는 2000년대부터 선진국을 중심으로 지속적으로 연구되고 있으며, 클러스터를 구성하는 CPU 개수 등에 따른 효율에 대한 연구도 이루어지고 있다^{[6]~[8]}.

본 논문에서는 본 연구팀에서 구축한 CPU 클러스터 하드웨어에 대한 시스템 구성을 설명하고, 공간 분할 병렬처리 방법에서 프로세서 간의 통신을 위해 MPI(Message Passing Interface) 라이브러리를 적용한 1차원 및 3차원 FDTD 기법에 대하여 기술하였다. 또한, 프로세서 간의 통신 시간을 최소화시키기 위해 이용한 3차원 공간 분할에 대하여 설명하고, 구현된 CPU 클러스터 기반의 병렬 FDTD 알고리즘의 성능이 하이퍼 모드의 구동 여부에 따라 어떻게 변하는지를 확인하기 위하여 단일 프로세서와 계산 성능을 비교 분석하였고, 단일 프로세서로는 계산할 수 없는 전기적으로 큰 콘크리트 구조물에서의 전자파 해석을 수행하였다.

II. 하드웨어 구축

공간 분할 병렬처리 FDTD 기법을 구현하기 위하여 본 연구팀에서는 그림 1과 같이 CPU 기반의 클러스터를 구

그림 1. 한양대학교 응용전자기술연구실의 CPU 클러스터
Fig. 1. CPU cluster at HYU AETL.

성하였다. 서버는 Dell사의 PowerEdge R310을 사용하고 있으며, 리눅스 기반의 CentOS 5.8을 OS로 사용하고 있다. 노드는 15개로 구성되어 있으며, 각 노드들은 Dell사의 OptiPlex 990SFF를 사용하고 있다. 각 노드는 한 개의 물리적 코어를 두 개의 논리적 코어로 동작하게 하는 하이퍼 스레딩(hyper-threading) 기술을 지원하는 Intel(R) Core(TM) i7-2600 쿼드코어 프로세서를 탑재하여 총 120(=4×2×15)개의 코어를 보유하고 있으며, 16 GB Non-ECC DDR3 1,333 MHz SDRAM 메모리로 구성되어 총 240(=16×15) GB의 메모리를 지원하며, 고성능 컴퓨터 모니터링 시스템인 Ganglia로 본 연구팀에서 구축한 CPU 클러스터를 모니터링 한다. 서버와 각 노드들의 사이는 1,000 Mbps CAT.6 다이렉트 랜 케이블로 연결하였다.

III. MPI-FDTD

CPU 기반의 병렬 FDTD 알고리즘을 구현하기 위해서는 필수적으로 다중 프로세서 환경에서 각 프로세서 간의 데이터 통신이 요구되며, 본 연구팀에서는 이를 위해 MPI 라이브러리^[9]를 적용하였다. 본 절에서는 데이터 통신을 설명하기 위해 1차원 MPI-FDTD 알고리즘에 대하여 간단히 설명하고, 이를 바탕으로 3차원 MPI-FDTD 알고리즘에 대하여 기술하였다. 또한, 3차원 MPI-FDTD 구현 시 발생하는 문제점을 분석하고, 그 해결방안을 설명하였다.

3-1 1차원 MPI-FDTD

그림 2는 1차원 MPI-FDTD에서의 데이터 통신 과정을

그림 2. 1차원 데이터 통신

Fig. 2. 1-D data communication.

도시한 것이다. 아주 간단한 예로, 9 Cell의 공간을 해석하기 위하여 3개의 CPU로 해석공간을 3 Cell씩 나누었다고 가정하자.

CPU 1에는 각각 3개의 Ex와 Hy, CPU 2에는 각각 3개의 Ex와 Hy, CPU 3에는 4개의 Ex와 3개의 Hy가 존재한다. 1차원으로 Ex를 업데이트하기 위해서는 좌우 양쪽의 Hy가 필요하고, Hy를 업데이트하기 위해서도 좌우 양쪽의 Ex가 필요한데, CPU 1에서 Hy3를 업데이트하기 위해서는 Ex3과 Ex4가 필요하다. 하지만 CPU 1에서는 Ex4가 존재하지 않기 때문에 CPU 2에서 가져와 계산하여야 한다. 한편, CPU 2에서 Ex4를 업데이트하기 위해서는 Hy3과 Hy4가 필요한데, CPU 2에는 Hy3이 존재하지 않기 때문에 CPU 1에서 가져와 계산하여야 한다. 이렇게 Ex와 Hy가 각 CPU 사이에서 송·수신하는 것을 데이터 통신이라 말하며, 이와 같은 데이터 통신은 병렬 FDTD 알고리즘에서 꼭 필요하다. 공간 분할 병렬처리를 위한 데이터간의 통신은 MPI 라이브러리를 이용하여 제어하는데, MPI를 이용한 간단한 MPI-FDTD 코드는 아래와 같다.

```
#include <mpi.h>
MPI_Init
MPI_Comm_Size
MPI_Comm_Rank
Setup_Parameter
for n=1:nstep
    Update_E_field
    MPI_Isend
```

```
MPI_Irecv
MPI_Wait
MPI_Barrier
Update_H_field
MPI_Isend
MPI_Irecv
MPI_Wait
MPI_Barrier
end
Post_Processing
MPI_Finalize
```

MPI 함수들을 사용하기 위해서는 코드의 처음에 MPI 헤더 파일을 포함시켜야 한다. MPI 헤더 파일은 MPI 서브루틴과 함수들의 프로토 타입을 포함하고 있으며, 매크로들의 정의와 MPI 관련 인수들과 데이터 타입들을 정의하고 있다. 헤더 파일을 설정한 뒤에는 MPI_Init 함수를 사용하여 MPI를 초기화 한다. MPI_Init는 MPI 함수를 이용한 코드 상에서 가장 처음에 나오는 함수로 MPI를 초기화 하며, 초기화 하는데 문제가 생기는 경우 오류 코드를 되돌려준다. MPI의 초기화 이후에는 MPI_Comm_Size 함수를 사용하여 CPU의 개수를 설정한다. 이 과정은 공간 분할 병렬처리를 하기 위하여 구동되는 가용 CPU의 총 개수를 선언하고, 그 값을 되돌려주는 작업이다. 가용 CPU의 개수를 설정한 후에는 MPI_Comm_Rank 함수를 사용하여 고유번호를 부여한다. 이 작업은 가용 CPU들에게 각각의 고유번호를 부여하여 사용자가 원하는 계산을 정해진 CPU에서 계산할 수 있도록 돕는 함수이다. 만약 n 개의 CPU가 설정되었다면, 각각의 CPU에는 0 부터 $n-1$ 까지 번호가 할당된다. 이렇게 MPI의 시작을 위한 함수들이 구동된 후, 해석 공간의 크기와 간격, 시간 간격 등의 변수 설정을 하고, E 필드와 H 필드를 업데이트하기 위한 for 루프문을 시작한다. E 필드를 업데이트 하고, MPI_Isend 함수를 이용하여 E 필드를 다른 CPU로 송신하고, 마찬가지로 MPI_Irecv 함수를 이용하여 E 필드의 정보를 수신한다. MPI_Wait 함수와 MPI_Barrier 함수를 이용하여 모든 CPU에서 E 필드의 송수신이 완벽히 끝난 이후에 H 필드 업데이트 과정을 진행할 수 있도록 돕는

그림 3. 1차원 및 3차원 공간분할
Fig. 3. 1-D and 3-D domain decompositions.

다. H 필드의 업데이트도 E 필드와 동일한 순서로 진행된다. 최종적으로 $nstep$ 에 해당하는 횟수만큼 for 루프문을 반복하게 되고, for 루프문이 끝나면 후처리 작업을 거친 후 MPI_Finalize 함수를 이용하여 MPI를 끝낸다.

3-2 3차원 MPI-FDTD

다음으로 3-1의 1차원 MPI-FDTD를 기반으로 하여 3차원 MPI-FDTD에 대하여 기술하겠다.

그림 3에서 확인할 수 있듯이 해석공간을 8개로 분할한다고 가정하면 1차원으로 나눌 때 데이터 통신량이 7개의 기준면적이 필요하지만, 3차원으로 나누게 될 경우, 3개의 기준면적만 송·수신하게 되므로 통신에 사용되는 시간을 기준으로 고려하면 3차원으로 공간을 분할하여 해석공간을 계산하는 것이 유리하다. 3차원의 MPI-FDTD는 1차원 MPI-FDTD와 달리 Ex, Ey, Ez, Hx, Hy, Hz의 6개의 필드 성분에 대한 업데이트가 이루어져야 한다.

그림 4와 같이 3차원 공간분할을 사용하는 3차원 MPI-FDTD는 MPI_Isend와 MPI_Irecv 함수를 이용하여 송수신이 이루어질 때 2차원 배열의 필드 정보가 필요하다. 예

그림 4. Ex 필드의 데이터 교환
Fig. 4. Data exchange of Ex field.

그림 5. 3차원 공간분할의 테이블 구성도
Fig. 5. Table of 3-D domain decomposition.

를 들어, Ex 성분은 2차원 필드 정보를 j prev, k prev로 송신하고, j next, k next에서 수신하며, Ey 성분은 2차원 필드 정보를 i prev, k prev로 송신하고, i next, k next로부터 수신한다. 마지막으로 Ez 성분은 2차원 필드 정보를 i prev, j prev로 송신하고, i next, j next로부터 수신한다. 한편, Hx 성분은 2차원 필드 정보를 j next, k next로 송신하고, j prev, k prev에서 수신하며, Hy 성분은 2차원 필드 정보를 i next, k next로 송신하고, i prev, k prev로부터 수신한다. 마지막으로 Hz 성분은 2차원 필드 정보를 i next, j next로 송신하고, i prev, j prev로부터 수신한다. 그림 2와 같은 1차원 데이터 통신에서 알 수 있듯이 E 필드와 H 필드의 개수가 상이한 점을 고려하여, 3차원의 MPI-FDTD에서도 각각의 CPU에 할당된 정확한 E 필드와 H 필드의 모델링이 필요하다.

그림 5는 해석공간을 xyz 축으로 3×3×3으로 나눈 3차원 공간분할을 도시한 그림이다.

그림 5의 각각의 테이블(CPU의 고유번호)들은 MPI_Isend와 MPI_Irecv 함수를 이용하여 인접한 테이블과 통신을 하게 된다. 예를 들어 (1, 1, 1)인 테이블은 각 이웃 테이블인 (1, 0, 1), (1, 2, 1), (1, 1, 2), (1, 1, 0), (0, 1, 1), (2, 1, 1)과 정보를 주고받는다. 하지만 $i=0$, 2인 테이블과 $j=0$, 2인 테이블, 그리고 $k=0$, 2인 테이블은 최 외곽에 위치하고 있기 때문에, 하나 이상의 이웃 테이블이 존재하지 않으므로 데이터 통신을 할 수 없는 구조적인 문제가 발생하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 테이블의 위치마다 각각의 업데이트 식을 모두 다르게 설정하여야 하는데, 이 방법은 코드도 복잡해져 비효율적인

해결 방법이라고 볼 수 있다. 이를 해결하기 위하여 해석 공간에 해당하는 테이블들을 감싸는 더미 테이블을 만들어 MPI_Procs_Null^[10]을 선언하였다. MPI_Procs_Null을 선언한 더미 테이블이 다른 테이블과 통신을 할 경우, 실제로 통신이 이루어지지 않지만 에러가 일어나지 않는다. 더미 테이블을 이용함으로써 경계에 존재하는 테이블들 사이의 데이터 송수신 간에 생길 문제를 해결할 수 있는 MPI 공간 분할의 경계조건을 설정하였다고 볼 수 있다.

IV. Numerical Example

CPU 클러스터 기반의 MPI 라이브러리와 3차원 공간 분할을 적용한 병렬 FDTD 알고리즘을 이용하여 계산하였을 때, CPU(코어)수에 따른 계산 속도를 확인하기 위해서 단일 프로세서의 계산 속도를 기준으로 다중 프로세서에서 사용하는 CPU의 수를 각각 8, 16, 24, 32, 40, 48, 60개로 계산시간을 측정하였다. 또한, 항상 하이퍼스레딩 기술을 이용하도록 하여 물리적 CPU 개수보다 2배 많은 논리적 CPU의 개수를 사용하는 하이퍼 모드를 동작하여 8, 16, 24, 32, 40, 48, 60, 72, 88, 104, 120개의 CPU를 구동하여 계산시간을 측정하였다. 해석 공간은 $200 \times 200 \times 200$ (cell) 크기의 자유공간으로 이루어져 있으며, $10 \times 10 \times 10$ (cell) 크기의 PML이 자유공간 각 면의 외부를 감싸고 있다. 시뮬레이션 수행을 위해 공간 간격은 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5$ mm로 선택하였으며, 시간은 $\Delta t = 9.526279$ ps, $nstep = 1000$ 으로 설정하였다. 입사하는 전자파는 미분형 가우시안 펄스인 포인트 소스를 해석 공간의 정 가운데로 여기시켰다. 다중 프로세서 FDTD 코드의 성능을 비교하기 위하여 동일한 조건의 단일 프로세서 FDTD 코드도 함께 시뮬레이션을 하였으며, 각 조건에 대한 계산 시간을 도식하면 그림 6과 같다.

그림 6에서 단일 프로세서 조건일 때 시뮬레이션의 계산 시간은 2,795초가 소요되었으며, 단일 프로세서 조건에서 걸린 시간을 기준으로 다중 프로세서 조건일 때 시뮬레이션의 계산 시간을 계산속도 향상도로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 기본 모드에서 CPU의 개수가 60개일 때의 계산 시간은 54초로 단일 프로세서 조건일 때보다 약 51.76배로 CPU의 수가 증가할수록 계산속도 향상도가 증가함을 알 수 있다. 하지만, CPU의 수가 많아

그림 6. CPU 수에 대한 계산 속도의 증가

Fig. 6. Speed up factor versus CPU numbers.

질수록 이상적인 계산시간 향상도보다 조금씩 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 하이퍼 모드를 동작시켜 동일한 실험을 진행한 결과, 기본 모드의 계산시간 향상도보다 두 배 정도 성능이 떨어짐을 확인할 수 있다. 이는 하이퍼 모드에서의 CPU 증가는 논리적인 CPU의 수를 증가시키지만, 계산 속도에는 영향을 주지 않음을 알 수 있으며, 따라서 물리적인 CPU의 증가 만이 계산 속도에 영향을 준다는 점을 알 수 있다. 단일 프로세서를 이용하여 시뮬레이션한 결과와 다중 프로세서를 이용하여 시뮬레이션한 결과의 정확도를 비교하기 위하여 포인트 소스를 여기시킨 지점에서 x, y, z 축으로 각각 5 cell 만큼 떨어진 곳의 Ez값을 비교하였다. $200 \times 200 \times 200$ (cell) 크기의 공간에서 단일 프로세서로 모의실험한 결과, 60개의 CPU로 모의실험한 결과, 그리고 $1,000 \times 1,000 \times 1,000$ (cell) 크기의 공간에서 60개의 CPU로 모의실험한 결과를 그림 7에서 비교하였으며, 보는 바와 같이 세 경우 모두 일치함을 확인하였다.

단일 프로세서로 모의실험을 한 결과와 60개의 CPU로 모의실험한 결과가 위의 실험에서와 같이 일치하다는 것을 토대로 크기가 $4 \times 4 \times 4$ (m)이고, 두께가 30 cm인 콘크리트 구조물의 외부에서 포인트 소스를 여기시키고, 콘크리트 구조물의 가운데에서 Ez 값을 측정한 결과와 콘크리트 구조물이 없는 자유공간의 가운데에서 Ez 값을 측정하여 비교한 결과는 그림 8과 같다.

콘크리트 구조물의 가운데에서 측정된 Ez 값의 크기가

그림 7. 시뮬레이션에 따른 Ez 값 비교

Fig. 7. Comparison of Ez value for various simulations.

그림 8. 콘크리트 내부에서의 Ez 값 변화

Fig. 8. Ez value changes inside concrete structure.

콘크리트 구조물이 없는 자유공간의 가운데에서 측정한 Ez 값의 크기에 비하여 작아진 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 콘크리트 구조물 외부에서 여기된 포인트 소스가 손실이 있는 물질인 콘크리트 구조물을 통과하며, 산란과 감쇄되었다는 것을 알 수 있다. 또한, 포인트 소스가 콘크리트 구조물을 통과하며, 유전율의 영향을 받아 콘크리트 구조물이 없는 자유공간에서 측정한 Ez 값에 비하여 늦게 도착하는 것을 볼 수 있었으며, 콘크리트 구조물 내부의 공진현상 때문에 여러 리플이 따라오는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 공간 분할 병렬처리를 위한 60개의 CPU로 이루어진 클러스터를 구축하였으며, 이를 기반으로 MPI를 이용하여 병렬 FDTD 알고리즘을 구현하였다. 이를 이용하여 단일 CPU 환경일 때보다 더욱 빠르게 계산을 수행할 수 있으며, 단일 프로세서 환경일 때보다 더욱 큰 규모의 해석공간에 대한 해석이 가능하다. 향후에는 인체, 항공기, 나노 플라즈모닉 구조 등 복잡하고 다양한 구조에 대한 효율적인 광대역 전자파 해석을 수행할 예정이다.

References

- [1] A. Taflov, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed., Artech House, 2005.
- [2] K. -Y. Jung, F. L. Teixeira, and R. M. Reano, "Au/SiO₂ nanoring plasmon waveguides at optical communication band", *J. Lightw. Technol.*, vol. 25, no. 9, pp. 2757-2765, Sep. 2007.
- [3] 하상규, 조제훈, 김형동, 최재훈, 정경영, "정확하고 효율적인 인체 FDTD 분산 모델링", *한국전자과학회 논문지*, 23(1), pp. 108-114, 2012년 1월.
- [4] 주정명, 홍진영, 신상진, 김동현, 오이석, "콘크리트 벽의 비파괴검사를 위한 초광대역 레이더의 2차원 FDTD 시뮬레이션에서 안테나 모델링의 영향", *한국전자과학회논문지*, 24(1), pp. 98-105, 2013년 1월.
- [5] 현승엽, "동축 프로브 급전구조에 대한 FDTD 전원 모델들의 상호 관계에 관한 비교 연구", *한국전자과학회 논문지*, 25(1), pp. 114-122, 2014년 1월.
- [6] C. Guiffaut, K. K. Mahdjoubi, "A parallel FDTD algorithm using the MPI library", *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 43, no. 2, pp. 94-103, Apr. 2001.
- [7] J. Wang, O. Fujiwara, S. Watanabe, and Y. Yamanaka, "Computation with a parallel FDTD system of human-body effect on electromagnetic absorption for portable telephones", *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 53-58, Apr. 2004.

- [8] Y. Zhao, Y. Hao, "Full-wave parallel dispersive finite-difference time-domain modeling of three-dimensional electromagnetic cloaking structures", *J. Comput. Phys.*, vol. 228, pp. 7300-7312, Jun. 2009.

- [9] MPICH (MPI Chameleon), Argonne National Laboratory: <http://www.mcs.anl.gov/>

- [10] 이홍석, 김정한, 이승우, 이석, "MPI 병렬 프로그래밍", 어드북스, 2010.

박 성 민

2011년 8월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)

2011년 3월~2012년 7월: 전자부품연구원 위촉연구원

2012년 9월~현재: 한양대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] FDTD 모델링, 병렬FDTD,

건물구조 해석

주 세 훈

1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)

1999년 2월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학석사)

1999년 3월~2000년 2월: 서울대학교 수증음향특화연구센터 연구원

2003년 8월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학박사)

2003년 11월~현재: 한국전자통신연구원 부설연구소 책임연구원

[주 관심분야] 초고주파 공학, 전자파 수치해석

추 광 욱

1991년 2월: 포항공과대학교 물리학과 (이학사)

1993년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)

1993년 3월~1997년 2월: 한국전자통신연구원 연구원

2001년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)

2002년 12월~현재: 한국전자통신연구원 부설연구소 책임연구원 실장

[주 관심분야] 고출력 전자기파, RF 필터, 배열안테나

박 윤 미

2004년 2월: 충남대학교 전자통신공학부 (공학사)

2010년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)

2010년 9월~2012년 4월: 삼성전자 무선사업부 책임연구원

2012년 4월~현재: 한국전자통신연구원 부설연구소 선임연구원

[주 관심분야] 전자파 수치해석, EMI/EMC, 고출력 전자기파

김 기 백

2010년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2012년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2012년 4월~현재: 한국전자통신연구원 부설연구소 연구원
[주 관심분야] 건물구조 해석, 안테나

정 경 영

1996년: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
1998년: 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
2008년: 미국 Ohio State University 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
1998년~2001년: 현대전자 전임연구원
2001년~2004년: 팬택엔큐리텔 선임연구원
2008년~2009년: 미국 Ohio State University 전기 및 컴퓨터공학과 Post-Doctoral Researcher
2009년~2011년: 아주대학교 전자공학부 전임강사
2011년~현재: 한양대학교 융합전자공학부 조교수
[주 관심분야] 전자파 수치해석, 복잡물질 전자파모델링, 플라스모닉 구조, HPEM, 초고주파공학