

외부 전자파 펄스에 의해 여기된 전송선로 구조의 시간 영역 응답

Time-Domain Response of Transmission-Line Structures Excited by an External Electromagnetic Pulse

김태현* · 정연춘** · 김세운*** · 박동철**** · 배범열**** · 박종한*****

Tae-Hyun Kim* · Yeon-Choon Chung** · Se-Yun Kim***
Dong-Chul Park**** · Bum-Youl Bae**** · Jong-Han Park*****

요 약

외부 전자파펄스에 의해 여기되어지는 두 개의 선로 구조 전송선에 대한 시간 영역 응답을 시간 영역 유한 차분 (FDTD) 기법을 이용하여 분석하였다. 외부 전자파는 TEM cell을 이용하여 생성시켰다. 주파수 영역에서 측정된 실험치를 역푸리에변환을 통해 시간 영역의 값으로 바꾼 후 시간 영역의 수치해석 결과와 비교하였다.

Abstract

The time-domain response of a two-conductor-structure transmission line excited by an incident electromagnetic pulse is numerically analyzed using the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method. The external electromagnetic pulse is generated by utilizing a TEM cell. The simulated time-domain response is compared with the time-domain response which is obtained by the Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) of the frequency domain measurement data.

I. 서 론

최근 전자산업의 눈부신 발달에 따라 전자기기들이 급속도로 늘어나고 있다. 이들 전자기기들은 고속 및 디지털화, 소형 및 집적화, 그리고 이동통신의 발달로 인한 무선화가 급진전되고 있다. 이에 따라서 전자기기에 관련된 신호의 대역폭이 크게 확

장되었으며, 고주파대의 전자파 방사(radiation)도 크게 증대되는 등, 우리 주변의 전자파 환경이 급속도로 나빠지고 있다.

이 같은 상황에서 대두된 가장 큰 문제점은 인접하고 있는 전자기기들 상호간이나 기기 내부의 밀집되어 있는 부품들 사이에서 또는 전자기기와 외부전자파 사이에서 형성되는 전자기적 결합(electromagnetic coupling) 현상으로 인한 전자기기들

「본 논문은 1995년 전파연구소의 연구비 지원에 의한 것임.」

* LG정밀 (LG Precision Co., Ltd.)

** 한국표준과학연구원 (Korea Research Institute of Standards and Science)

*** 한국과학기술연구원 (Korea Institute of Science and Technology)

**** 충남대학교 전파공학과 (Dept. of Radio Sciences and Engineering, Chungnam Nat'l Univ.)

***** 전파연구소 (Radio Research Lab.)

· 논문번호 : 96-2-028

· 접수일자 : 1996년 7월 1일

의 정보손실 및 오동작이다.

전자기적 결합현상으로 인한 전자기기 또는 부품들간의 상호간섭으로 인한 문제는 다양한 형태 및 환경속에서 발생하지만, 실제로 많은 기기들에서 상호 간섭 현상이 심각하게 발생하는 부분은 신호가 전달되는 경로라 할 수 있는 전송선이다. 따라서 서어지(surge), 전파송신기, 정전기방전, 인접선로 등과 같은 전자기적인 방해(disturbance)가 전송선으로 결합되는 현상을 다루는 문제는 EMC (ElectroMagnetic Compatibility) 분야의 중요한 기본적인 문제로서 그 동안 외부 전자파에 의해 여기된 두개의 선로 또는 다중선로(multiconductor transmission line)에 대한 결합 특성이 주파수 영역에서 해석되었으며[1], [2], 이어서 시간 영역에서도 해석되었다[3]~[5].

본 논문에서는 접지판 위에 놓여진 전송선이 외부 전자파에 의해 여기되는 경우, 전송선에 유기되는 전압을 [3]의 방법에 따라 시간 영역에서 FD-TD 방법으로 해석하였으며 개발된 프로그램의 수치해석 결과를 실험장치를 구성시켜 측정한 실험결과와 비교하였다.

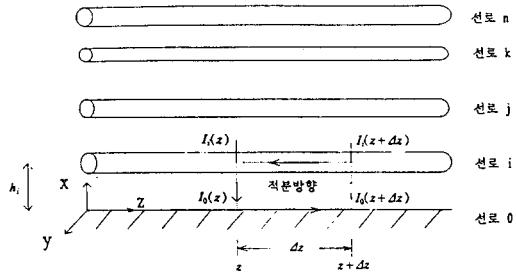
II. 다중전송선 방정식 및 외부 전자파

2-1. 다중전송선 방정식

[그림 1]과 같이 완전 도체인 접지면 위에 임의의 단면을 가지고 z축으로 균일한, n개의 전송선 구조를 생각한다. 여기서, 전송선의 단면 크기는 외부 전자파의 파장에 비해 매우 작다고 생각하고 전송선에서의 주요 전파 모드는 TEM (Transverse ElectroMagnetic) 모드라 가정한다.

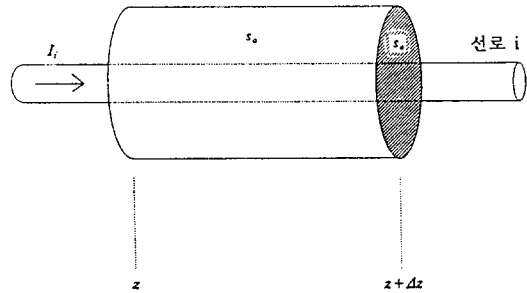
위와 같은 다중전송선의 전압, 전류 방정식은 두개의 식으로 표현된다. 시간 영역에서 다중전송선 방정식의 첫번째 식을 유도하기 위해서 [그림 1]의 선로 0과 선로 i 사이의 선분과 z와 z+Δz 사이의 선분으로 이루어진 점선으로 둘러 싸인 폐곡선에 대하여 Maxwell 방정식을 적용시켜 선적분을 행

하면 다중전송선 방정식의 첫번째 방정식인 식 (1)을 구할 수 있다. 다음, [그림 2]와 같이 선로 i를



[그림 1] n+1 전송선로의 옆면도

[Fig. 1] Side view of (n+1) conductor transmission line.



[그림 2] 두번째 전송선 방정식 유도를 위한 면적 정의

[Fig. 2] Definition of the surface for derivation of the second MTL equation.

감싸고 옆부분의 면적이 S_0 , 끝부분의 면적이 S_i 인 원통을 고려하자.

전류의 연속 방정식을 [그림 2]의 원통에 적용하면 시간 영역에서의 다중전송선 방정식의 두번째 방정식인 식 (2)를 구할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} [V_i^s(z)] + [L] \frac{\partial}{\partial t} [I_i(z)] + [R][I_i(z)] = [E_{zi}^i(z, h_i) - E_{z0}^i(z, 0)] \quad (1)$$

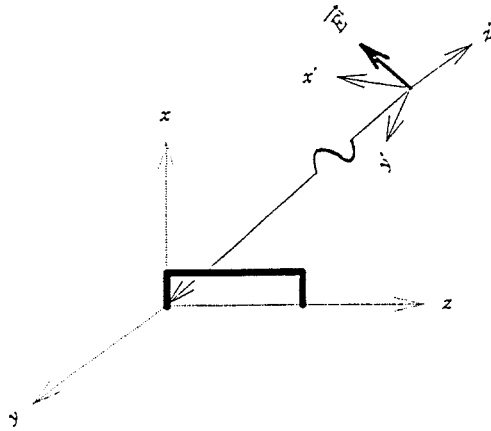
$$\frac{\partial}{\partial z} [V_i^s(z)] + [C] \frac{\partial}{\partial t} [V_i^s(z)] + [G][V_i^s(z)] = 0 \quad (2)$$

식 (1), (2)에서 $[L]$, $[C]$, $[R]$, $[G]$ 는 다중전송선의 파라미터로 각각 단위 길이당 인덕턴스, 캐퍼시턴스, 저항, 콘덕턴스 행렬을 나타내고 있으며 윗첨자 s 는 산란장 (scattered field), 윗첨자 i 는 입사장 (incident field)을 나타내고 있으며 또한 아래첨자 i 는 i 번째 선로를 의미한다.

2-2. 외부 전자파

다중전송선에 외부에서 임의의 방향으로 임의의 직선 편파를 가진 평면파가 입사할 경우를 [그림 3]에 나타내고 있다.

[그림 3]의 평면파를 수학적으로 나타내면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.



[그림 3] 전송선에 입사하는 외부 전자파
[Fig. 3] Incident field on a transmission line.

$$\vec{E}(x, y, z, t) = (e_x^i \vec{a}_x + e_y^i \vec{a}_y + e_z^i \vec{a}_z) E_0 \left(t - \frac{x}{v_x} - \frac{y}{v_y} - \frac{z}{v_z} \right) \quad (3)$$

식 (3)에서 e_x^i, e_y^i, e_z^i 는 각각 입사전장의 x, y, z 성분, $\vec{a}_x, \vec{a}_y, \vec{a}_z$ 는 각각 x, y, z 축 방향으로 단위 벡터, v_x, v_y, v_z 는 각각 x, y, z 축 방향으로의 속도를 나타낸다. 이 값들은 [그림 3]에서 벡터내적을 이용하면 쉽게 구해진다. 접지면의 효과는 영상법을 이용하여 식 (4)로 표현되는 다른 하나의 외부 전자파 (접지면에 의한 반사파)를 고려하면 된다.

$$\vec{E}(x, y, z, t) = (\vec{e}_x^i \vec{a}_x + \vec{e}_y^i \vec{a}_y + \vec{e}_z^i \vec{a}_z) E_0 \left(t - \frac{x}{v_x} - \frac{y}{v_y} - \frac{z}{v_z} \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 반사전장 성분인 e_x^r, e_y^r, e_z^r 들은 $x=0$ 평면에서의 경계조건을 만족해야 하므로 $e_x^r = e_x^i, e_y^r = -e_y^i, e_z^r = -e_z^i$ 이다. 따라서 접지면이 있는 경우 임의의 지점에서 외부 전자파의 총전장은 입사전장과 접지면에 의한 이미지 전장을 합하여 구할 수 있다.

III. 시간 영역 유한 차분 (FDTD) 기법

시간 영역 유한 차분 (FDTD) 기법은 시간 영역에서 Maxwell 방정식과 같은 미분 방정식을 유한 차분 (Finite Difference) 방정식으로 근사화시켜 직접 풀기 때문에 전자파 산란 문제, 전송선 문제 등을 쉽게 해석할 수 있는 유용한 기법이다.

해석의 편의상 다중전송선이 무손실 선로라 가정하면 저항과 콘덕턴스 행렬은 무시되어도 되므로 식 (1)과 (2)는 다음의 식 (5)와 (6)으로 간략화된다.

$$\frac{\partial}{\partial z} [V_i^s(z)] + [L] \frac{\partial}{\partial t} [I_i(z)] = [E_{zi}^i(z, h_i) - E_{z0}^i(z, 0)] = [V_{hi}^s(z)] \quad (5)$$

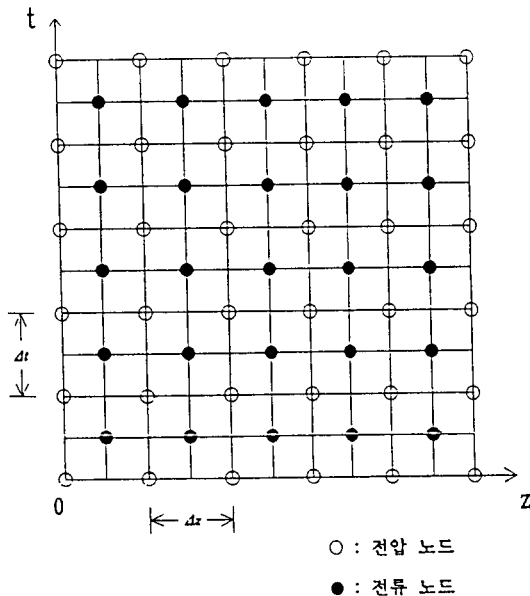
$$\frac{\partial}{\partial z} [V_i^s(z)] + [C] \frac{\partial}{\partial t} [V_i^s(z)] = 0 \quad (6)$$

[그림 4]는 다중전송선 방정식인 식 (5)와 식 (6)을 FDTD 기법으로 풀기 위한 전체적인 그리드 구조를 보여주고 있다. [그림 4]에서 시간 분할은 Δt 로 나타내었으며 공간 분할은 Δz 로 나타내었다.

[그림 4]에서 보인 그리드 구조에 중심 차분 근사법(centered difference approximation)을 적용하여 식 (5)와 식 (6)을 컴퓨터 계산에 적합한 시간 영역 유한 차분법의 근사식으로 식 (7), (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$([V_k^{n+1}]^s = ([V_k^n]^s - \frac{\Delta t}{\Delta z} [C]^{-1} \{ [I_{k+1/2}^{n+1/2}] - [I_{k+1/2}^{n+1/2}] \} \quad (7)$$

$$([I_{k+1/2}^{n+3/2}] = [I_{k+1/2}^{n+1/2}] - \frac{\Delta t}{\Delta z} [L]^{-1} \{ ([V_{k+1}^{n+1}]^s - ([V_k^{n+1}]^s) \} + \Delta t [L]^{-1} [V_k^s]_{k+1/2}^{n+1} \quad (8)$$



[그림 4] 전송선 해석을 위한 전체적인 그리드 구조
[Fig. 4] Representation of total grid for solving transmission line.

식 (7), (8)을 풀어 다중전송선 임의의 지점에서 전압 전류값을 구하기 위해서는 적절한 초기값과 경계조건이 주어져야 하며, 아울러 해가 발산하지 않으려면 식 (9)로 나타내지는 Courant 안정 조건을 만족해야 한다.

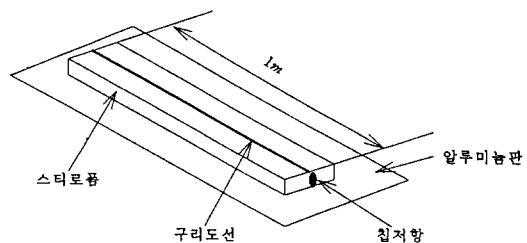
$$\Delta t \leq \Delta z / v_p \quad (9)$$

여기서 v_p 는 계산 영역 매질 내에서의 전파 속도를 의미한다.

IV. 실험 및 결과 고찰

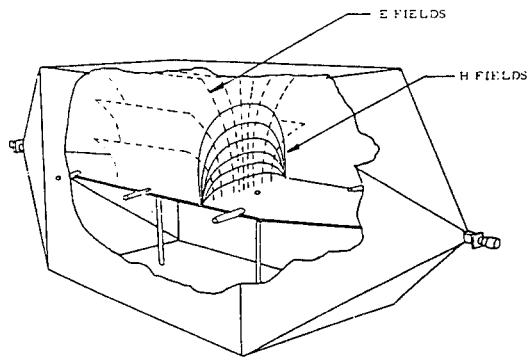
전송선 구조를 [그림 5]와 같은 접지판 위에 단일 도선이 있는 두 개의 선로 구조로 제작하여 구성하였다. 접지판은 크기 $120 \times 25.4 \times 0.2$ cm인 알루미늄판이며, 접지판과 도선 사이에는 유전율이 공기와 비슷한 1 cm 두께의 스티로폼을 사용하여 단일 도선을 고정시켰으며 도선은 직경이 1.36mm, 길이가 1 m인 구리 도선이였다. 이러한 두개의 선로 구조 전송선에서의 L, C 파라미터는 각각 $L = 0.68 \mu\text{H}/\text{m}$, $C = 16.42 \text{ pF}/\text{m}$ 로 계산되었다. 저항은 주파수 10~400 MHz에서 측정된 값이 49Ω 으로 거의 변화가 없었고 위상도 3.5° 정도밖에 변하지 않는 고주파 칩저항을 사용하였다.

이 전송선 구조에 외부 전자파를 입사시키기 위



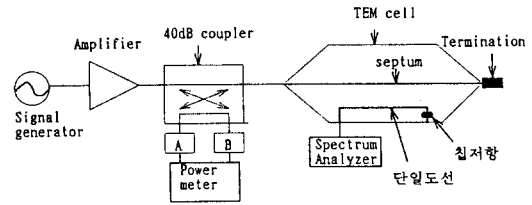
[그림 5] 실험을 위해 제작된 단일 도선 구조
[Fig. 5] Structure of a single wire transmission line for the measurement.

하여 [그림 6]과 같은 TEM cell을 특성 임피던스가 50Ω 이며 동작 주파수대역이 $0 \sim 500 \text{ MHz}$ 가 되도록 설계하여 제작하였으며 이때 테이퍼링된 부분을 고려하지 않은 TEM cell의 크기는 $120 \times 25.4 \times 12.2 \text{ cm}$ 이었다. 이 TEM cell 내의 바닥에 제작된 전송선 구조를 놓으면 두 개의 선로 구조에 외부 전자파가 입사되는 상황을 실현시킬 수 있다. 왜냐하면 TEM cell의 내부 도체인 septum과 바닥의 접지면 사이에는 [그림 6]에 보인 전기장과 자기장이 형성되면서 길이 방향으로 평면파가 진행하고 이 진행과에 의해 TEM cell 바닥에 놓인 두 개의 선로 구조는 여기되기 때문이다. 다만 이 여기 방법에서는 외부 전자파가 $+z$ 방향으로 입사하여 [그림 3]에 보여진 일반적인 입사 상황중 한가지 특수한 경우를 보여주고 있다. 이러한 여기 방법을 선정한 이유는 전송선 구조가 설치된 후에도 TEM cell내에 전기장의 왜곡이 거의 없어 전기장의 세기를 비교적 정확히 예측할 수 있기 때문이다.



[그림 6] TEM cell의 구조
[Fig. 6] Structure of the TEM cell.

실험장비의 설치를 [그림 7]과 같이 구성하였으며, 스펙트럼 분석기로 전송선 입력단에 유기되는 전압을 측정하였고 TEM cell내에서 균일 평면파의 크기는 쌍방향성 결합기와 전력계를 이용해 입사전력과 반사전력을 측정한 후 식(10)을 이용해 계산하였다[6].



[그림 7] 실험 설치도
[Fig. 7] Block diagram of the test setup.

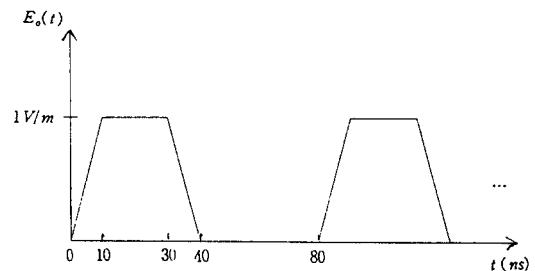
$$E_{rms} (V/m) = \frac{P_{net} \cdot Z_c}{h} \quad (10)$$

여기서, P_{net} = TEM cell에 공급되는 순전력 (W)

Z_c = TEM cell에 특성 임피던스 (Ω)

h = Septum과 접지면 사이의 거리 (m)

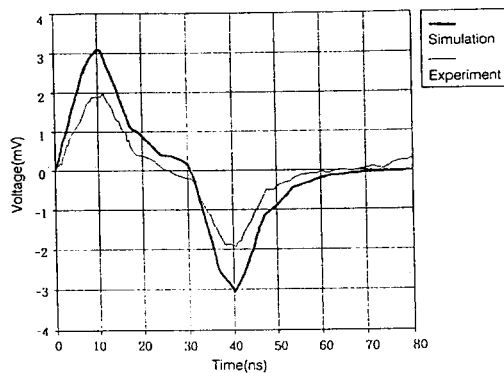
수치해석에 사용되어진 외부 전자파 펄스의 모양이 [그림 8]에 나타나 있다. 시간 파형의 스펙트럼 성분중 500 MHz 를 넘는 성분이 미약하도록 연속 펄스의 파형을 결정하였다. 수치해석적으로 가능한 연속펄스 파형을 TEM cell내에서 시간 영역에서 직접 발생시키는 방법이 수월치 않아 실험은 주파수 영역에서 수행되었으며 주파수 영역에서의 측정결과를 역푸리에변환 (IFFT)시켜 시간 영역의



[그림 8] 인가되는 외부 전자파 펄스 파형
[Fig. 8] Pulse shape of the electromagnetic pulse incident on the transmission line.

실험치를 얻은 후 이 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. [그림 9]에 전송선 입력단에 유기된 전압에 대한 두 결과를 비교하여 보여주고 있다.

수치해석 결과와 실험 결과를 비교해 보면 이론치와 측정치의 전체적인 경향은 대체로 잘 일치하고 있으나 이론치가 측정치보다 약 1.7배 크게 나타나고 있다. 이 값 차이 원인을 계속 규명중에 있으며 오차의 원인으로는 이론치는 무손실을 가정한 경우의 값이지만 실험치는 실제의 손실이 포함된 점, 스펙트럼 분석기로 연결되는 부분과 칩저항이 연결되는 부분의 도선이 이론치 계산에서는 고려되지 않은 점, TEM cell안에서의 전계의 불균일, 측정장비의 오차 등을 생각해 볼 수 있다.



[그림 9] 실험 결과와 수치해석 결과의 비교
[Fig. 9] Comparison of measured and simulated results.

V. 결 론

외부 전자파 펄스에 의해 여기된 전송선로에 유기되는 전압을 시간 영역에서 FDTD 기법을 이용해 수치해석적으로 얻었으며 TEM cell을 사용한 실험장치를 구성하여 두 개의 선로 구조 전송선에 유기되는 전압을 주파수 영역에서 측정하였다. 주파수 영역에서 측정된 전압데이터를 역푸리에 변환

시켜 시간 영역의 전압을 얻은 후 이 결과를 수치해석 결과와 비교하였다. 두 결과가 약 1.7배의 차이를 보여주고 있으나 전체적인 경향성에서 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] C. D. Taylor, R. S. Satterwhite and C. W. Harrison, Jr., "The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. AP-13, pp. 987-989, Nov. 1965.
- [2] C. R. Paul, "Frequency response of multiconductor transmission lines illuminated by an electromagnetic field," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. EMC-18, pp. 183-190, Nov. 1976.
- [3] A. K. Agrawal, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by nonuniform electromagnetic field," *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, vol. EMC-22, no. 2, pp. 119-129, May 1980.
- [4] D. E. Merewether, "A numerical solution for the response of a strip transmission line over a ground plane excited by ionizing radiation," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. pp. 398-403, NS-18, Aug. 1971.
- [5] C. R. Paul, *Analysis of Multiconductor Transmission Lines*, John Wiley & Sons, 1994.
- [6] Society of Automotive Engineers J 1113-23, "Electromagnetic compatibility measurement procedure for vehicle component; Radiated immunity-stripline method", *Society of Automotive Engineers*, 10, Oct. 1991.

김 태 현



1994년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (학사)
1996년 2월 : 충남대학교 전자공학과 대학원 (석사)
1996년 4월 ~ 현재 : LG정밀(주) 연구소 1그룹 전문화실 마이크로웨이브팀 연구원

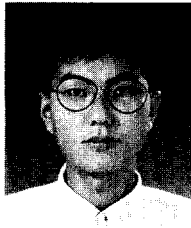
이브팀 연구원

[주 관심분야] EMI/EMC, 레이더 송수신기

김 세 윤

1974년 3월 ~ 1978년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (학사)
1978년 3월 ~ 1980년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (석사)
1980년 3월 ~ 1984년 8월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (박사)
1984년 9월 ~ 1986년 11월 : KAIST 전기 및 전자공학과 (Post-doctor)
1986년 12월 ~ 현재 : KAIST 정보전자연구부 선임연구원, 책임연구원
[주 관심분야] 파동의 회절 및 복사, 전자파 Imaging, 안테나 설계, EMI/EMC

배 범 열

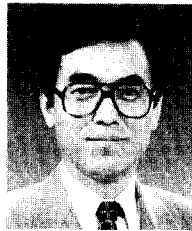


1994년 2월 : 충남대학교 전자공학과 졸업
1995년 3월 ~ 현재 충남대학교 대학원 전자공학과 석사과정

정 연 춘

1984 2월 : 경북대학교 물리학과 졸업
1986년 2월 : 경북대학교 대학원 물리학과 졸업(석사)
1996년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 전자공학과 박사과정
1986년 1월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 선임연구원
1989년 1월 ~ 현재 : CISPR, IECTC77 국제전문위원
1995년 6월 ~ 현재 : CISPR WG1 member

박 동 철



1974년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1976년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1984년 12월 : University of California, Santa Barbara (공학박사)

1976년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 전파공학과 교수
[주 관심분야] 수동초고주파공학, 안테나 및 전파전파, EMI/EMC

박 중 한



1980년 2월 : 서울대학교 물리교육학과 졸업(이학사)
1985년 2월 : 한국과학기술원 물리학과(이학석사)
1991년 8월 : 한국과학기술원 물리학과(이학박사)

1986년 9월 ~ 1991년 8월 : KAIST/KIT 연구조교
1990년 3월 ~ 1993년 12월 : 현대전자(주) 반도체연구소 선임연구원
1993년 12월 ~ 현재 : 정보통신부 전파연구소 공업연구관