



전도성 전자파 해석 연구 동향 분석



박 윤 미
한국전자통신연구원
부설연구소



주 세 훈
한국전자통신연구원
부설연구소



김 기 백
한국전자통신연구원
부설연구소

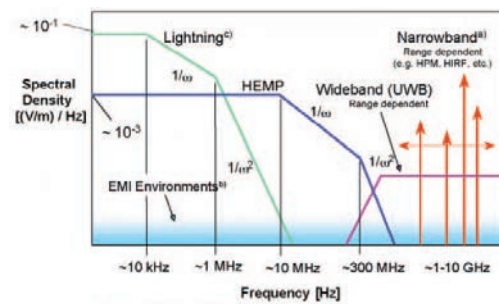


추 광 옥
한국전자통신연구원
부설연구소

I. 개요

고출력 전자기파 (Electro-Magnetic Pulse, EMP)는 전기적 장비의 물리적인 손상 및 오작동을 일으킬 수 있는 강력하고 순간적인 전자기적 충격파를 말한다. 이러한 EMP는 핵 폭발에 의한 핵 EMP와 전기 장치에 의한 비핵 EMP로 분류할 수 있다. 핵 EMP 중에서는 20km~30km 이상 고고도 핵 폭발에 의한 HEMP(High altitude EMP)가 대표적이고, 비핵 EMP는 파형에 따라 UWB(Ultra Wide Band), DS(Damped Sinusoidal), HPM(High Power Microwave)로 구분한다. <그림 1>은 EMP 종류별 주파수 대역을 대략적으로 표시한 것이다.

전자파는 기본적으로 건물을 투과하기 때문에 EMP 위협으로부터 건물 내부 전자장비를 보호하기란 쉽지가 않다. <그림 2>는 외부에서 인가된 전자파의 복사성 및 전도성 전달 경로를 보여준다. 다양한 전기적 장비들이 위치한 지상건물은 건물 외벽을 구성하는 콘크리트 혹은 철근을 포함하고 있는 강화 콘크리트 그리고 유리 창문과 같은 개



<그림 1> 고출력 전자기파 펄스의 종류와 주파수 특성^[1]

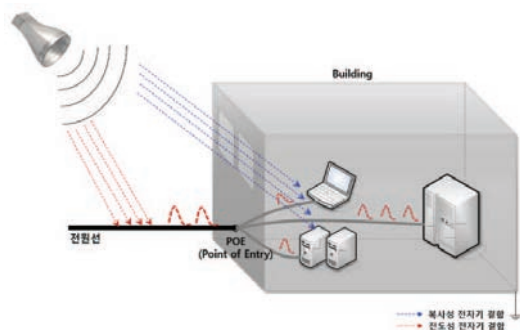
구면으로 구성되며, 통신 신호의 전달 및 전력 공급을 위해서 전송 선로가 지상건물의 외부에서 내부로 연결되어 있다. 이런 상황에서 건물 외부에서 인가된 전자파는 건물의 구성 물질 및 구조에 영향을 받아 지상건물 내·외부로 방사되고(복사성 전자기 결합), 방사된 전자기장은 전송 선로에 유도되어(전도성 전자기 결합) 건물 내부 장비에 간섭 혹은 장애를 일으킨다.

대형 구조물 해석 대상에서의 전자기 결합(Electromagnetic coupling) 현상을 단일 수치해석기법으로 해석 시에는 다음과 같은 어려움이 있다.

첫째는 요소 분할에 따른 어려움이다. 수치해석 시 가장 중요한 단계인 요소 분할 단계에서는 해석 대상의 가장 작은 구조물과 가장 높은 해석 주파수를 고려하여 요소를 분할한다. 수십 m의 물리적으로 큰 건물 내부에 있는 지름 수 mm인 케이블에서의 전자기 결합 현상을 수십 GHz 대역까지 한 번에 모의하기 위해서는 수많은 요소가 생성되어야 하고 결국에는 해석 시간이 길어지거나 메모리 용량이 부족하게 된다.

둘째는 복잡한 구조의 유전체 해석 문제이다. 대형 구조물은 콘크리트, 철근, 유리창, 전선으로 구성되어 있고, 대지와 공기에 동시에 접촉된 형태이다. 따라서 이러한 복잡한 유전체들로 이루어진 대상에 대한 해석이 가능해야 하며 주파수에 따른 유전율의 분산 특성도 반영되어야 한다.

상기 문제점은 특히 수치해석 구조물 대비 물리적 크



〈그림 2〉 복사성 및 전도성 전자기 결합 경로

기가 작은 전송 선로에서 더욱 심하다. 그래서 최근 상용 전자파 해석 S/W 업체는 Finite Difference Time Domain(FDTD), Method of Moment(MoM), Finite Element Method(FEM)과 같은 3D full wave analysis 기법과 Multiconductor Transmission Line(MTL) 기법 등 다양한 기법들을 결합하여 전도성 전자기 결합 수치해석 한계를 극복하는 방향으로 개발하고 있다. 또한 새롭게 공간 분할 개념을 도입하여 시간과 메모리를 절약하는 기법으로 대형 표적 해석 시 장점을 갖는 Electromagnetic Topology(EMT) 기법에 대한 연구도 국내·외 학교 및 연구소에서 활발히 진행하고 있다.

본 고에서는 전도성 전자파 해석을 위한 상용 전자파 해석 S/W를 소개하고, 최근 연구의 중요성이 대두되고 있는 EMT 기법의 원리와 연구 동향, 그리고 EMT 기법을 기초로 한 상용 S/W를 소개한다.

II. 상용 S/W의 전도성 전자파 해석 기법

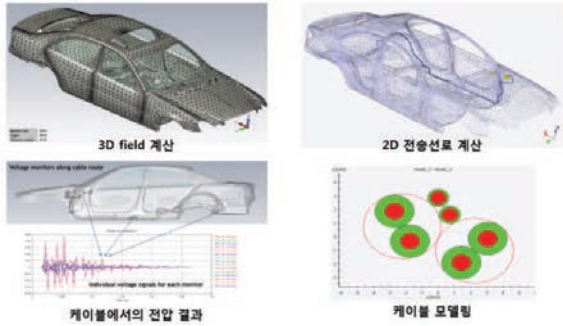
1. CST cable studio를 이용한 전도성 전자파 해석

CST Cable Studio(CS)는 Electro-Magnetic Interference(EMI), Electro-Magnetic Susceptibility(EMS) 현상과 대형 시스템 내 케이블 구조의 전도성 경로를 통한 전파를 빠르고 정

확하며 손쉽게 해석할 수 있는 시뮬레이션 도구다. CST CS에서는 전자기적으로 복잡한 대상의 해석을 위하여 3차원 수치해석 기법(FDTD), 다중 전송선 해석 기법(MTL), 회로 해석 기법을 결합한다^[2].

전도성 전자파 해석을 위해서 CS에서는 CST Microwave Studio(MWS)가 CST Design Studio(DS), CS와 연동된다.

해석 순서는 먼저 3D cad file을 이용하여 모델링 한다. 이후에 케이블의 종류, 부설 형태 등을 모델링 한다. 전송 선로 이론에 근거하여 케이블의 전송 선로 파



〈그림 3〉 CST CS로 자동차 내부에 케이블이 있는 구조를 해석한 사례

라미타들을 추출한 후, CST MWS에서 케이블 주위의 전자기장 값을 transient solver를 이용하여 계산한다.

기존 MWS의 transient solver만을 이용한 3차원 full wave 해석 시에는, 건물과 케이블이 함께 있을 때 케이블에 맞추어 요소를 생성해야 하므로, 요소의 개수가 상당히 많아 메모리 문제를 발생시킬 수 있다. 그러나 CS의 해석 알고리즘에서는 케이블의 전송 선로 파라미터가 추출된 후에는 케이블을 고려하지 않고 케이블 주위의 전자기장 값만 사용하므로, 요소 생성 시 유리한 장점이 있다.

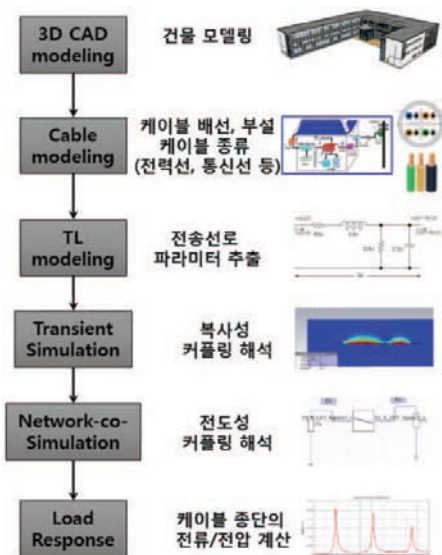
FEKO는 MoM기법을 기초로 하여 MLFMM, FEM, UTD, GO, PO 등 다양한 수치해석 기법을 사용하여 광대역 전자기 문제를 해석한다.

그리고 나서 케이블 주위의 전자기장 값을 이용하여 케이블에 유기된 전류와 전압을 다중 전송선 기법에 근거하여 계산한다. CS에서의 계산 결과는 DS와 연동되어 DS 내부의 내장형 네트워크 시뮬레이터를 통해 케이블 배선과 종단 등가회로 해석을 가능하게 한다.

CS는 회로 해석 엔진과 3D EM solver간에 전류와 전자기장을 교환할 수 있게 해서 케이블에서의 복사현상이나 감응현상을 해석할 수 있다.

또한 케이블의 radiation/irradiation 현상 뿐 아니라 특히 bi-coupling 효과 해석이 가능하다. MWS와의 연동을 통해 건물 벽 매질의 분산, 비등방성 특성을 반영한 지상 배선 해석이 가능하고, 자체 보유 library를 이용하여 케이블 모델링이나 회로 소자 모델링을 쉽게 할 수 있다. DS와의 연동을 통해 spice model이나 s-parameter 파일을 불러들여 해석하는 기능도 지원함으로써 케이블에서의 전도성 전자기 결합 현상을 해석하고 이로 인해 인접한 장비들에 미치는 영향을 모의할 수 있다.

CST CS는 시간영역 해석을 기초로 한 S/W이므로 펄스신호와 같은 시간영역 신호원이 전기적으로 큰 대상에 인가되어 발생하는 전도성 전자기 결합 현상을 모의하는 데에 유용하게 사용되고 있다.



〈그림 4〉 CST CS에서 건물 규모에서의 전도성 전자기 결합 해석 알고리즘

2. FEKO를 이용한 전도성 전자파 해석

FEKO는 MoM 기법을 기초로 하여 Multilevel Fast Multipole Method(MLFMM), FEM, Uniform Theory of Diffraction(UTD), Geometrical Optics(GO), Physical Optics(PO) 등 다양한 수치해석 기법을 사용해서 광대역 전자기 문제를 해석하는 시뮬레이션 도구다^[3]. 따라서 전기적으로 소형인 해석 대상부터 비행기나 함정과 같은 대형 구조물에서의 전자파 현상 해석이 가능하다. 특히 FEKO는 내부적으로 보유하고 있는 다양한 해석 기법들을 결합해서 사용할 수 있는 기능을 제공하므로 단일 기법으로 풀기에 한계가 있는 해석 문제들을 효율적으로 풀 수 있는 장점이 있다.

FEKO는 다양한 user-interface로 구성되는데 그 중 모델링 관련 모듈인 CADFEKO에서 케이블 모양과 harness 모델링이 가능하다. <그림 5>와 같이 다양한 케이블 구조를 모델링할 수 있으며, 케이블, 커넥터, 측정 프로브를 포함한 cable harness의 모델링도 CADFEKO에서 가능하다. 또한 복잡한 케이블들은 KBL 파일을 이용하면 모델링과 관리가 용이하다.

케이블 단면은 2D static FEM solver에 의해 R, L, G, C per-unit-length-parameter가 계산된다. 케이블과 연결된 소자들은 저항, 커패시터, 인덕터를 비롯하여 spice 회로로 모델링이 가능하며, s-parameter 계산 혹은 측정 파일도 지원되어 다양한 소자들이 연결된 케이블에서의 전자기 결합 현상을 해석할 수 있으므로, 케이블에서의 전자기 결합 현상이 주변 장비, 소자에 주는 영향을 모의할 수 있다.

FEKO에서는 케이블에서의 전압 신호원에 의한 radiation 문제와 외부의 전자기장에 의한 케이블에서의 irradiation 문제 모두 해석 가능하다.

특히 irradiation 문제는 MTL 기법이나 MoM/MTL

기법이 사용된다. Irradiation 문제의 해석 원리는 다음과 같다.

- 케이블을 제외한 해석 영역에서 케이블 경로를 따라 near field 계산
- 케이블 경로를 따라 R, L, G, C 파라미터 계산
- 계산된 near field를 분산 신호원으로 인가하여 케이블에서의 유도 전류 계산
- Shield를 통한 bi-directional 커플링 계산 가능

EMT 기법은 시스템 내부로 침투하는 에너지의 전달 경로를 공간 특성에 따라 외부구조/결합경로/내부경로로 나누어 해석하며, 각 부분을 모델링한 후 BLT 방정식을 이용하여 해석 결과를 재결합하는 방식의 해석 기법이다.

FEKO에서는 이와 같은 기능을 이용하여 <그림 5>와 같은 자동차나 항공기 내부의 복잡한 케이블에서의 전자기 결합 현상을 모의할 수 있다. 특히 소형에서 대형까지 다양한 크기의 해석 대상이나 금속 또는 주기 구조 해석 대상에서의 전도성 전자기 결합

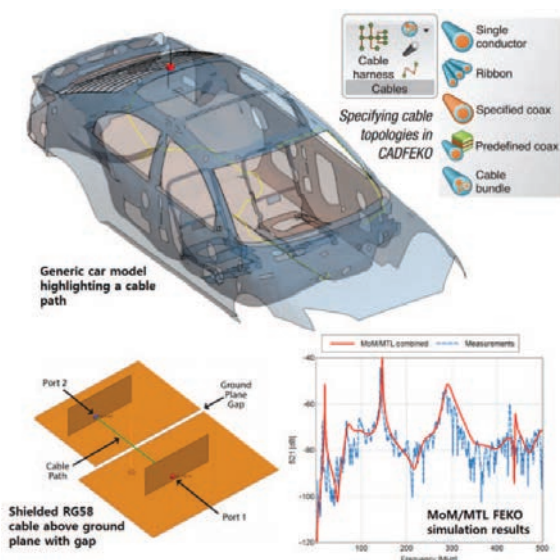
해석에 용이해서 최근 많이 이용되고 있는 추세다.

III. EMT 기법에 기초한 전도성 전자파 해석 기법

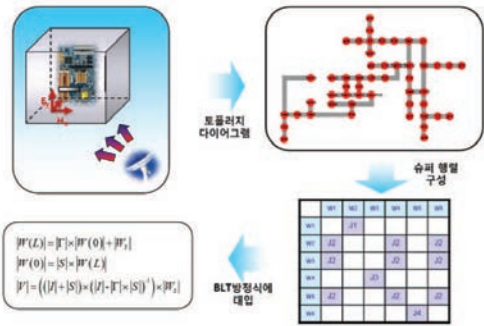
다양한 시스템들의 존재하는 전자기 환경에서는 내부 구조의 복잡도와 전자기장 에너지의 전자기 결합 방법이 각기 다르기 때문에 전자파 적합성 문제를 모의하는 것은 어려운 일이다^[4]. 시스템 내부에서 발생하는 전자기 결합 현상은 다음과 같다^[5].

- 도체에서의 inductive, capacitive 결합
- 직접적인 전자기장의 방사 결합
- 도체에서의 전류, 전하의 전달
- 개구부를 통한 전자기장 필드의 전달
- 전자기장의 확산 현상에 의한 침투
- 공진기 모드에 의한 공진

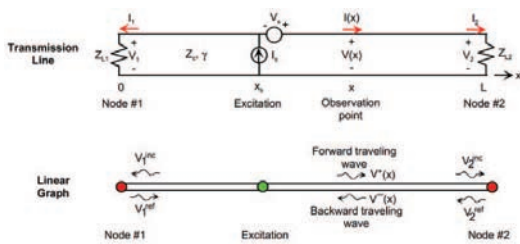
따라서 <그림 6>과 같이 전체 시스템을 한 번에 해석



<그림 5> FEKO로 자동차 내부에 케이블이 있는 구조를 해석한 사례와 RG58 케이블에서의 전자기 결합 현상 해석 사례



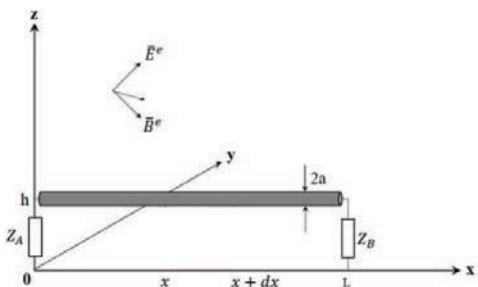
〈그림 6〉 EMT 기법의 원리



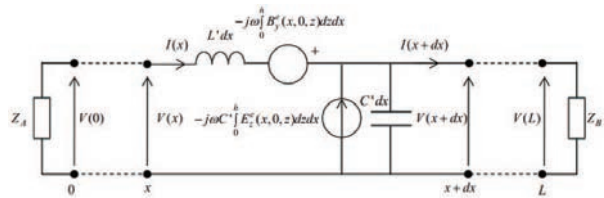
〈그림 7〉 전송선의 토폴로지 다이어그램 표현^[8]

하는 것이 아니라, 시스템 내부로 침투하는 에너지의 전달 경로를 공간의 특성에 따라 외부 구조/결합 경로/내부 구조로 나누어 해석을 실시하고, 각 부분을 모델링 한 후 BLT 방정식을 통해 해석 결과를 재결합하는 방식으로 해석하는 기법이 도입되게 되었다^[6]. 이러한 방법이 전자기 토폴로지(Electro-Magnetic Topology, EMT)기법의 시초이며 C. E. Baum에 의해 정식화 되었다^[7].

전송선은 〈그림 7〉과 같이 토폴로지 다이어그램으로



〈그림 8〉 완전 도체 상에 있는 단일 선로에 전자기장이 입사하는 모습^[9]



〈그림 9〉 전자기장이 인가된 무손실 단일 선로의 등가회로 (Taylor 소스 모델링)^[9]

표현 가능하며 이어질 분산 소스 모델링과 BLT 방정식 원리에 따라 전송선에서의 전도성 전자기 결합 해석이 이루어진다.

1. 전도성 전자기 결합 해석 원리

외부에서 인가된 전자기장이 전송 선로에서 전도성 전자기 결합하는 경로는 다음과 같다. 첫째는 인가된 전자기장이 자유 공간에서 전파되어 전송 선로에 전류나 전압이 유도되는 것이고, 다른 하나는 유도된 전류나 전압이 전송 선로를 따라 전달되는 것이다. 전송 선로에 전류나 전압이 유도되는 현상은 분산 소스 모델링을 통해 해석할 수 있고, 유도된 전류나 전압이 전송 선로를 따라 전달되는 현상은 분산 소스를 BLT방정식에 대입함으로써 모의할 수 있다.

가. 전송 선로에 유기되는 분산 소스 모델링

전송 선로에 전류/전압이 유기되는 현상을 모의하기 위해서 분산 소스 모델링을 전송 선로 방정식에 적용하고 각 전송 선로 구조에서의 경계 조건을 이용한다. 전송 선로에서의 전자기 결합 현상을 모의하기 위한 분산 소스 모델링은 Taylor, Agrawal, Rachidi의 세 가지 모델링 기법이 있고, 본 고에서는 이 중 보편적으로 사용되고 있는 Taylor 소스 모델링 기법을 소개한다.

1965년에 Taylor, Satterwhite와 Harrison은 전자기장이 전송 선로에 전자기 결합하는 현상을 유도 전류향과 유도 전압 향으로 모델링 하도록 수식을 제안하였다. 수식은 다음과 같다^[9].

$$\frac{dV(x)}{dx} + j\omega L' I(x) = -j\omega \int_0^h B_y^e(x, 0, z) dz \quad (1)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + j\omega C' V(x) = -j\omega C \int_0^h E_z^e(x, 0, z) dz \quad (2)$$

중단 전류와 전압의 경계 조건은 식 (3)-(4)와 같고, 식 (1)-(4)를 등가회로로 나타내면 <그림 9>와 같다.

$$V(0) = -Z_A I(0) \quad (3)$$

$$V(L) = -Z_B I(L) \quad (4)$$

나. 중단 전류와 전압을 구하기 위한 BLT 방정식

BLT 방정식에서는 집중 전류와 전압 소스를 이용하여 중단 전류와 전압 응답을 계산한다. 위의 세 가지 분산 소스 모델링 기법 중 Taylor 원리를 이용하여 분산 소스를 모델링 한 후 BLT 방정식에 대입하였다^[10].

중단 부하에 의한 반사 계수 ρ_1 과 ρ_2 , 전송 선로의 특성 임피던스 Z_C , 길이가 L 인 직선 전송 선로에서 중단 전류/전압 응답($I(0)$, $I(L)$, $V(0)$, $V(L)$)은 식 (5)-(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I(0) \\ I(L) \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_C} \begin{bmatrix} 1 - \rho_1 & 0 \\ 0 & 1 - \rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho_1 e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} - \rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} V(0) \\ V(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \rho_1 & 0 \\ 0 & 1 + \rho_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\rho_1 e^{\gamma L} \\ e^{\gamma L} - \rho_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma x_s} [V_{S1}(x_s) + Z_C I_{S1}(x_s)] dx_s \\ -\frac{1}{2} \int_0^L e^{\gamma(L-x_s)} [V_{S1}(x_s) - Z_C I_{S1}(x_s)] dx_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

이때 source vector는 식 (7)과 같으며 x_s 는 분산 소스의 위치, $V_{S1}(x_s)$, $I_{S1}(x_s)$ 는 식 (1)-(2)의 우변인 분산 소스를 나타낸다.

이처럼 인접한 전자기장에 의해 전자기 결합한 전송 선로의 중단 전류/전압 응답 계산은 분산 소스를 이용한 BLT 방정식을 이용하여 계산할 수 있다. 이와 같은

해석 기법은 크고 복잡한 대상의 내부 전송 선로에서 발생하는 전도성 전자파 특성을 간단하게 모의할 수 있어 국내·외에서 다양한 연구가 진행되고 있다.

2. 연구 동향

가. 국외 연구 동향

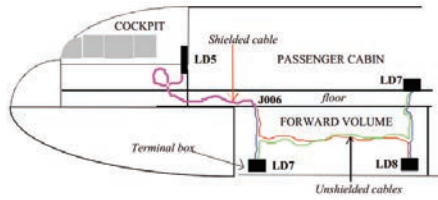
1960년대 후반 이후로 미국에서는 EMP에 관한 연구가 군사 분야에서 민간 분야까지 활발히 진행되어 왔다. 1970년대 이전까지 EMP에 관한 연구는 실험 위주로 진행되었으나 EMP의 전자기 결합 현상 해석에 대한 요구가 발생하면서, 실제 시스템에서의 전자기 결합 현상을 수학적으로 분석하는 노력이 시작되었다.

1974년에 C. E. Baum은 전자기 결합 현상을 해석하기 위하여 공간 분할의 개념이 포함된 EMT 기법을 제안하였다^[6, 11]. 건물 규모의 매크로 시스템을 해석할 시에 기존의 3D full wave 해석 기법은 해석 시간과 메모리가

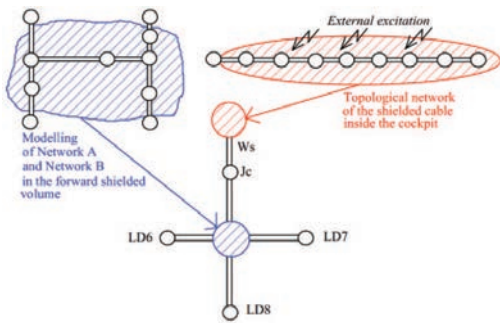
많이 소요되므로 공간 분할의 개념을 도입하였고, 나누어진 공간별로 따로 해석하는 방식으로 해석 시간과 메모리를 많이 줄이는 효과를 거두었다. 이후 EMT는 supermatrix 개념과 결합하여 BLT 방정식으로 발전되었다^[12-13]. BLT 방정식은 토폴로지 네트워크를 구성하고 있는 모든 영역에서의 전류와 전압 응답을 구하는 주파수 영역 행렬 방정식이다.

전자기장이 전송 선로에 커플링 되는 현상에 대한 해석은 전체 해석 영역을 EMT 기법을 적용하여 여러 개의 하위 영역으로 분할하는 것에서 시작한다. 분할된 영역들은 junction으로 표현하고, 각 junction은 커플링이 일어나는 경로를 따라 tube로 연결되는 토폴로지 네트워크를 구성하여 각각의 요소에 대한 해석을 수행한 후, BLT 방정식을 통해 결과를 재조립하여 전체 시스템의 응답을 구한다. 이와 같은 전송 선로와 EMP의 전자기 결합 현상은 주로 F. M. Tesche와 T. K. Liu에 의해서 연구되었다^[14].

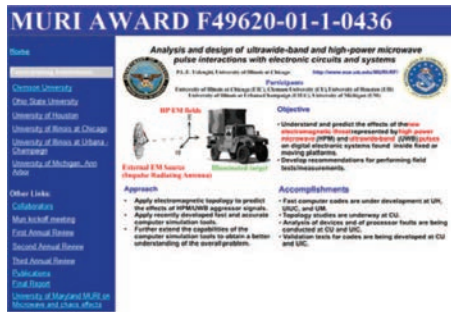
미국, 프랑스 및 독일을 비롯한 유럽 등에서는 대형 시설에서의 해석을 위하여 다양한 학교와 회사가 참여하는 컨소시엄을 구성하였으며, EMT 기법을 기초로 하는 해석 방법을 연구하고 있다.



〈그림 10〉 보잉 707 항공기의 영역 분할^[15]



〈그림 11〉 보잉 707 항공기의 토폴로지 네트워크^[15]



〈그림 12〉 MURI 프로젝트

외부에서 인가된 전자파에 노출된 전송 선로는 토폴로지 접근 방식에 따라 전송 선로를 tube로 모델링 할 수 있다. 따라서 복잡한 구조에서의 전송 선로와 EMP의 전자기 결합 현상은 각각의 junction을 해석하고 junction을 연결하는 각 tube의 영향을 분석함으로써 얻을 수 있다^[8]. 또한, 종단에 비선형 부하를 포함하고 있는 전송 선로의 해석을 위해서, BLT 방정식은 기존의 주파수 영역에서 시간 영역으로 확장되었다^[14].

프랑스의 J. P. Parmantier는 비행기 동체 내에 있는 복잡한 전송 선로 네트워크에서의 전자기 결합 현상을 해석하기 위한 알고리즘과 EMT 소프트웨어의 상용화를 위한 연구를 수행하였다^[15-16].

최근 독일에서는 선박이나 항공기 등 대규모 시설의 취약성 분석을 위한 EMT 기법 연구가 진행되고 있다^[17].



〈그림 13〉 HIRF SE 프로젝트 참여기관

대규모 시설에는 다양한 전자기 결합 경로가 존재하기 때문에, EMT 기법을 이용하여 커플링 경로에 따라 시스템을 분할하고, 각각의 특성에 맞는 수치해석 기법이나 측정 기법을 적용한다.

대형 시설에서의 전자기 결합 현상을 해석하는 연구는 해석 대상의 규모가 크므로 많은 양을 해석하게 되어 고성능, 고비용의 H/W가 구축되어야만 가능하다. 또한, 해석 결과를 검증하기 위한 대규모 측정 시설을 갖추기 위해서도 막대한 비용이 소요된다. 따라서 최근 미국이나 유럽에서는 이러한 대규모의 연구를 진행하기 위해 컨소시엄을 구성하여 다양한 학교와 회사가 참여하고 적극적인 연구가 진행되어 의미 있는 연구 결과들이 도출되고 있다.

미국에서는 2001년부터 2006년 8월까지 미 국방성과 공군 연구소에서 주관하는 MURI 프로젝트에 6개의 대학(Ohio State University, University of Illinois at Chicago, Clemson University, University of Houston, University of Illinois at Urbana-Champaign, University of Michigan)이 참여해서 HPM과 UWB로 인한 전자 시스템에서의 위협을 연구하였다^[18]. 연구 내용은 대규모 시스템에서 전자기장 에너지가 소스로부터 위협 대상으로 전달되는 전자기 결합 메커니즘이며, 이를 해석하기 위해 EMT에 기초한 hybrid EM solver를 연구하였다. 프로젝트 기간 중 240개의 크고 작은 연구 출판물들을 발표했으며, 그

중 F. M. Tesche, C. M. Butler가 재직 중인 Clemson University에서 전도성 전자파 해석 관련 연구가 진행되었다.

또한, 2005년부터 2008년까지 University of Missouri-Columbia에서 EMT 관련 연구가 N. E. Islam에 의해 수행되었다^[19]. 특히 이번 과제는 EMT를 기초로 만들어진 상용 시뮬레이션 프로그램인 CRIPTE를 전자기 결합 해석 시 적용하고 EMT 알고리즘에 대하여 연구했다.

유럽에서는 2008년 12월부터 2012년 11월 말까지 HIRF SE 프로젝트를 통해 EM 환경에서의 항공기의 정상적인 동작을 해석하기 위한 수치해석 프레임 연구를 진행 중이다^[20]. 44개의 연구 기관, 241,217명의 인원이 참여하고 있으며, 이 중에는 EMT에 기초한 상용 시뮬레이션 프로그램인 CRIPTE를 개발한 프랑스의 Onera社를 비롯하여 3D CAD 분야의 Dassault, EM 시뮬레이션분야의 CST, HPM 대표 연구 기관으로는 FOI, 수치해석 분야의 연구대학으로는 La Sapienza 대학이 있다.

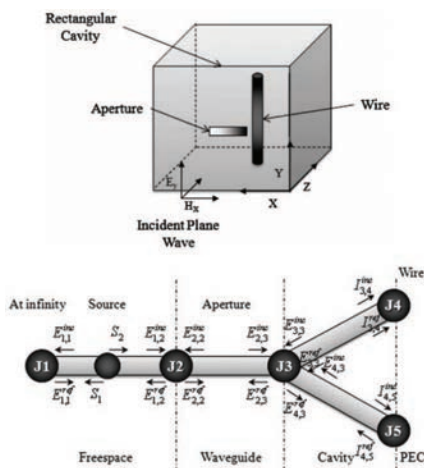
나. 국내 연구 동향

국내에서는 1990년대 초반부터 연구가 시작되었으

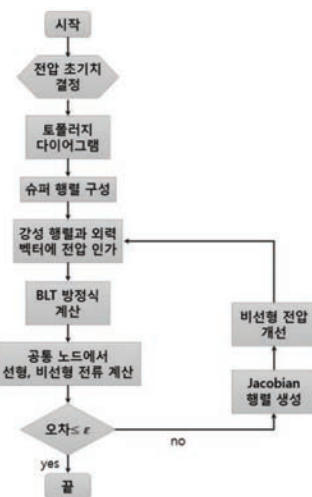
며, EMT 기법을 이용하여 크고 복잡한 시스템에서의 전자기 결합 현상을 해석하기 위한 연구가 수행되었다. 건물 외부에서 인가된 전자기파가 내부로 침투되는 전자기 결합 현상뿐 아니라, 내부의 전자 장비를 구성하는 PCB 보드와 케이블 등에 미치는 영향까지도 한 번에 모의하고자 하였다. 이를 위해 필드 해석과 회로 해석을 위한 새로운 EMT 기법과 이러한 기법들을 결합하기 위한 하이브리드 기법에 관한 연구를 수행하는 방향으로 진행되었다.

서울대학교 연구팀에서는 2000년대 중반부터 EMT 관련 연구를 시작해서 2007년에 선형 및 비선형 회로 해석을 위한 EMT 기법을 제안했다^[21-22]. 선형 연구를 바탕으로, 2008년에는 외부에서 인가된 전자기장이 개구부를 통해 침투하여 내부의 케이블과 전도성 전자기 결합하는 현상을 해석하기 위한 연구도 수행되었다^[23]. 구조가 다른 3차원 공간에 전자기장이 침투하는 현상을 3층 layer(free space, waveguide, cavity) 차폐 구조로 보고 EMT를 적용하였다. 따라서 각 layer 사이의 경계를 junction으로 정의하고, 전자기장의 침투 경로를 tube로 도시하여 토폴로지 다이어그램을 구성하였다. 또한, 2010년에는 비선형 시스템에서의 전도성 전자기 결합 해석을 위해

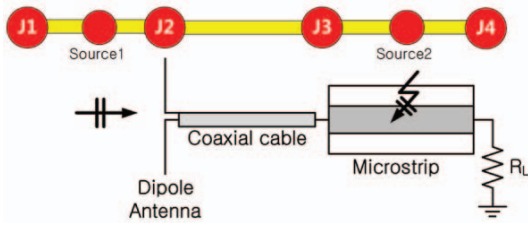
국내에서는 필드 해석과 회로 해석을 위한 EMT 기법과 다양한 기법들을 결합하기 위한 하이브리드 기법에 대한 연구들이 진행되고 있다.



〈그림 14〉 직사각형 개구부, 내부 전선을 포함하는 공진기와 토폴로지 다이어그램^[23]



〈그림 15〉 제안된 EMT-HB 기법의 알고리즘^[24]



〈그림 16〉 균일 전송 선로 전자기 결합 현상 해석 모델과 토폴로지 다이어그램^[25]

Harmonic Balance (HB) 기법과 EMT 기법이 결합한 hybrid EMT 기법의 연구가 수행되었다^[24]. 제안된 기법에서는 HB 계산 결과를 이용하여 EMT 내에서 해석을 수행하고, EMT 해석 결과는 다시 HB에 입력되어 종로 조건을 만족할 때까지 EMT 기법과 HB 기법이 실시간으로 통신할 수 있도록 새로운 비선형 EMT 알고리즘을 제안하였다.

광운대학교 연구팀에서도 2000년대 중반부터 EMT를 연구했으며 EMT를 이용한 외부 전자파에 노출된 전송 선로에서의 전도성 전자파 해석 연구와 다수의 개구부를 포함한 공진기에서의 전자기 결합 현상 연구를 수행하였다^[25-26].

연세대학교 연구팀에서도 2013년에 도파관 내부의 PCB 기판에서의 전자기 결합 현상을 BLT 방정식을 이용하여 모의하는 연구를 수행하였다^[27].

1990년대 초중반에 KIST와 KAIST 연구팀에서 비균일 전송 선로 구조에 대한 모델링 방법이 연구되었다. 전송 선로는 균일 전송 선로와 비 균일 전송 선로로 구분된다. 특히 비 균일 전송 선로는 단위 길이당 임피던스와 전파 상수가 일정한 균일 전송 선로와 달리 위치에 따른 함수로 표현되기 때문에 해석이 어렵다. 따라서 비 균일 전송 선로의 전자기 결합 해석을 위해 근사적으로 적용할 수 있는 모델링 방법에 관한 연구도 수행되었다. 전송 선로의 단면 형태가 전송 방향으로 일정하지 않고 위치마다 변하는 비 균일한 구조에 대해서 전송 선로 방정식을 TEM 모드에 대해 유도하였으며, 이를 이용하여 계산한 전송 선로의 입력 임피던스

를 비 균일 전송 선로 해석 방법으로 구한 입력 임피던스와 비교하였다^[28]. 또한, 비 균일 전송 선로에서 전파 모드를 평면형 TEM이 아닌 원통형 TEM으로 가정하여 전송 선로 방정식을 유도하였다^[29-30].

최근에는 한양대학교 연구팀에서 지표면 위에 놓인 비 균일 전송 선로의 유기 응답을 chain matrix를 이용하여 해석한 연구가 진행되었다^[31]. 이처럼 국내의 비 균일 전송 선로 연구는 기존의 해석적인 방법을 이용하여 유기 응답을 계산하기 매우 어려우므로 이를 해결하기 위한 해석 방법을 제안하고 적용하는 연구 위주로 진행되었다.

3. EMT 기법에 기초한 상용 S/W인 EMEC을 이용한 전도성 전자파 해석

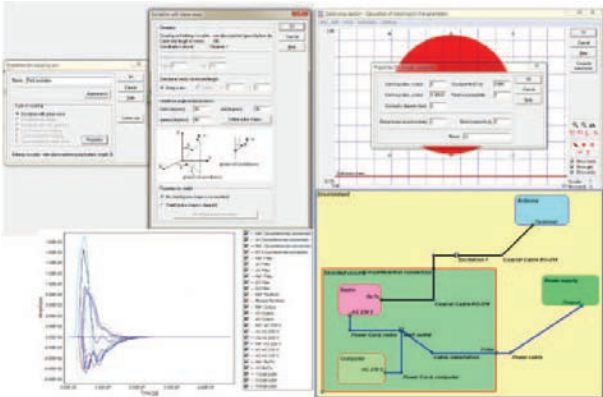
EMEC은 스웨덴의 J. Carlsson과 Torbjorn Karlsson에 의해 2002년에 처음으로 개발되었다. EMEC은 EMT 기법을 기초로 시스템에 연결된 선로에 유기되는 전압과 전류를 계산하는 전도성 전자파 해석 프로그램이다.

EMEC은 EMT 기법을 기초로 시스템에 연결된 선로에 유기되는 전압과 전류를 계산하는 전도성 전자파 해석 프로그램으로 케이블에서의 전자기 결합 현상을 시간, 주파수 영역에서 해석한다.

EMEC을 이용한 전도성 전자파 해석은 다음의 순서로 진행된다. 해석 대상을 선정한 후 CAD file, 배선도 등을 통해 실제 해석 대상의 물리적 구조와 전자기 결합 경로를 파악하여 zone,

functional unit, cable, port 등으로 분할한다. 분할된 공간들은 케이블로 연결되며, 분할된 공간과 케이블들의 물리적 구조를 모델링 하거나 직접 측정하여 주파수 특성을 구함으로써 분할된 공간들의 전자파 특성을 구한다. 그리고 나서, 분할된 공간과 케이블들의 주파수 특성들은 전자기 결합 경로에 따라 재조립되어 전체 해석 대상의 주파수 영역 특성 혹은 시간영역 특성을 모의할 수 있다^[32].

EMEC의 가장 중요한 기능은 EMT 기법을 이용하여 케이블에서의 전자기 결합 현상을 시간, 주파수 영역에서 해석하는 것이다. 또한 전도성 경로에 의한 전자기 결합 현상과 복사성 경로에 의한 커플링 현상 일부를



〈그림 17〉 EMEC에서의 건물 규모 대상 해석 사례

모의할 수 있다. 예를 들어, 케이블에 직접 전류나 전압이 주입된 경우뿐만 아니라, 외부에서 인가된 전자기장에 노출된 케이블의 유기 응답 계산이 가능하며, 차폐 구조를 포함하고 있거나 다른 전자 장비들과 연결된 경우도 회로 해석 도구와의 결합을 통해 계산할 수 있다.

또한, 케이블의 단면 모델링을 통해 그 케이블에서의 전송 선로 파라미터 계산이 가능하고, MoM solver를 이용해서 복잡한 구조의 케이블에 유기되는 전류 계산도 가능하다. 실제 해석 대상은 케이블이 다양한 장비와 연결된 구조이므로, 전자기장이 장비에 미치는 영향을 모의하기 위해서는 케이블이 연결된 장비를 등가 모델링해야 한다. EMEC에서는 회로 해석 solver를 포함하고 있어 각 케이블과 연결된 수동, 능동 소자의 회로 계산이 가능하고, library에 포함되지 않은 소자는 측정을 통해 s-parameter를 추출해서 이용하는 것도 가능하다. 추가로 zone에서 차폐장비로 인한 감쇠 특성(SE) 계산, SNR과 BEP 계산도 가능하다. 또한, matlab data와 호환이 가능하다.

EMEC은 full wave analysis solver를 제공하는 상용 S/W에 비해서 다소 제한적인 모델 해석기능이 제공되지만 원래의 목적이 정확한 값을 계산하기 보다는 대형 구조물을 빠르고 간단하게 해석하는 것이므로 해석 대상에서의 전도성 전자기 결합 경향을 빠르게 파악하는 데에 유용하다.

IV. 결론

대형 구조물 내의 선로에 대한 전도성 전자기 결합 현상을 수치해석기법으로 해석하기 위해 다양한 전도성 전자파 해석 상용 S/W들의 특징과 해석 원리에 관해서 살펴보았다. 그리고 EMT 기법의 원리를 소개하고 국내 및 국외 동향과 EMT 기법에 기초한 상용 S/W에 대하여 서술하였다. 이와 같은 전자파 해석 기법의 발전을 통해서 EMP로부터 건물 내부 전자 장비를 보호하기 위한 방호대책 수립 및 상세 설계에 커다란 진전을 이루어질 수 있을 것이라 기대한다.

참고 문헌

- [1] W. Radasky, Intentional Electromagnetic Interference(IEMI) and Its Impact on the U.S Power Grid, Meta-R-323, Jan. 2010.
- [2] CST Cable Studio 2013 Workflow.
- [3] FEKO User manual 2011.
- [4] 박윤미, 전자기 토폴로지 기법을 이용한 외부 전자파가 전자 시스템의 RF 회로에 미치는 영향 해석, 서울대학교 대학원 박사학위논문, 2010.
- [5] <http://www.ece.uic.edu/MURI-RF/kickoff/Tesche.ppt>.
- [6] J. M. Carter and W. L. Curtis, Common Mode Model Development for Complex Cable Systems, Boeing Company, AFWL-TR-74-60, 1974.
- [7] C. E. Baum, How do Think about EMP Interaction, The 1974 Spring FULMEN Meeting, Kirtland AFB, Apr. 1974.
- [8] F. M. Tesche and C. M. Butler, On the Addition of EM Field Propagation and Coupling Effects in the BLT equation, Interaction Notes 588, pp. 1-43, Jun. 2004.
- [9] F. Rachidi, A Review of Field-to-Transmission Line Coupling Models with Particular Reference to Lightning-Induced Voltages, X International Symposium on Lightning Protection, Nov. 2009.



- [10] F. M. Tesche, M. V. Ianoz, and T. Karlsson, EMC analysis methods and computational models, Wiley-Interscience, 1996.
- [11] C. E. Baum, Reminiscences of High-Power Electromagnetics, IEEE Trans. on EMC., vol. 49, no. 2, pp.211-218, May 2007.
- [12] C. E. Baum, T. K. Liu and F. M. Tesche, On the analysis of general multiconductor transmission-line networks, Kirtland AFB, NM, Interactions Note 350, 1978.
- [13] C. E. Baum, Electromagnetic topology for the analysis and design of complex electromagnetic systems, in Fast Electrical and Optical Measurements, J. E. Thompson and L. H. Luessen, Eds. Dordrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff, pp. 467-547, 1986.
- [14] F. M. Tesche, Development and Use of the BLT equation in the Time Domain as Applied to a Coaxial Cable, IEEE Trans. on EMC., vol. 49, no. 1, pp. 3-11, Feb. 2007.
- [15] J. P. Parmantier, Applications of EM topology on complex wiring systems, International Symposium on EMC., Oct. 1999.
- [16] J. P. Parmantier, Numerical Coupling Models for Complex Systems and Results, IEEE Trans. on EMC., vol. 46, no. 3, Aug. 2004.
- [17] R. K. Nana, S. Dickmann and F. Sabath, Electromagnetic Field Vulnerability of Complex Systems an Application of EM Topology , Advanced in Radio Science, vol. 6, pp. 273-277, 2008.
- [18] MURI project, <http://www.ece.uic.edu/MURI-RF/>.
- [19] N. E. Islam, Application of Advanced Concepts and Techniques in Electromagnetic Topology Based Simulation: CRIPTE and Related Codes, AFOSR Grant FA9550-05-1-0323, 2008.
- [20] HIRF-SE project, <http://www.hirf-se.eu/hirf/>.
- [21] Yoon-Mi Park, Jung-Yub Lee, Sehoon Hwang, Hyun-Kyo Jung, Young-Seek Chung, Hyeong-Seok Kim, Analysis of Printed Circuit Boards Based on Electromagnetic Topology, Journal of JSAEM, vol. 15, no. 3, pp. 218-221, 2007.
- [22] Yoon-Mi Park, Young-Seek Chung, Changyul Cheon and Hyun-Kyo Jung, Investigation of a Method for RF Circuits Analysis Based on Electromagnetic Topology, Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 4, no. 3, pp. 396-400, 2009.
- [23] Yoon-Mi Park, Younju Lee, Young-Seek Chung, Changyul Cheon and Hyun-Kyo Jung, Electromagnetic Field Penetration Analysis of a Rectangular Aperture-Backed Cavity Based on Combination of Electromagnetic Topology and Mode Matching, Electromagnetics, vol. 29, issue 6, pp. 447-462, 2009.
- [24] Yoon-Mi Park, Jong-Gun Lee, Changyul Cheon, Hyun-Kyo Jung and Young-Seek Chung, Numerical Technique for Nonlinear Circuit Analysis Using the Method of Electromagnetic Topology Based on Harmonic Balance, Electromagnetics, vol. 30, issue 6, pp. 541-553, 2010.
- [25] 강원준, 문상곤, 김준호, 천창울, 정용식, BLT 방정식을 이용한 고출력 전자파가 고주파 회로에 미치는 영향에 관한 연구, 한국통신학회논문지, 제35권, 제10호, pp.1520-1525, 2010년 10월.
- [26] Won-June Kang, Vea-o Lee, Sang-Kon Mun, Young-Seek Chung and Changyul Cheon, A Study for the EM Waves on the Cavity with Multi-Rectangular Apertures Using BLT equation, Antennas and Propagation Society International Symposium, 2010.
- [27] Jin-Kyung Du, Sun-Mook Hwang, Jae-Woon Ahn, Jong-Gwan Yook, Analysis of Coupling Effects to PCBs Inside Waveguide Using the Modified BLT Equation and Full-Wave Analysis, IEEE Trans. on MTT., vol. 61, no. 10, Oct. 2013.



- [28] 홍성용, 김세윤, 나정웅, 비균일 전송 선로의 임피던스 해석, 1990년도 마이크로파 및 전파전파·광파 및 양자전자공학 연구회 합동학술대회 논문집, 제13권, 1호, pp. 38-41, 1990년 5월.
- [29] 홍성용, 김세윤, 나정웅, 비균일 전송 선로의 전자기적 결합, I:원통형 전송 선로 방정식의 해석, 전자공학회논문집, 제29권, 12호, pp.1132-1139, 1992년 12월.
- [30] 홍성용, 김세윤, 나정웅, 비균일 전송 선로의 전자기적 결합, II:원통형 TEM 모드 해의 수정, 전자공학회논문집, 제30권, 2호, pp.95-100, 1993년 2월.
- [31] 조제훈, 이진호, 김형동, Chain Matrix를 이용한 Twisted 케이블의 EMP(Electromagnetic Pulse) 결합 해석, 한국전자파학회논문집, 제21권, 7호, pp.734-743, 2010년 7월.
- [32] Torbjorn Karlsson, EMEC manual, <http://emec.se>, Nov. 2011.



주 세 훈

- 1997년 2월 한양대학교 전파공학과 (학사)
- 1999년 2월 한양대학교 전자통신전파공학과 (석사)
- 1999년 3월~2000년 2월 서울대학교 수중음향 특화연구센터 연구원
- 2003년 8월 한양대학교 전자통신전파공학과 (박사)
- 2003년 11월~현재 한국전자통신연구원 부설연구소 책임연구원

〈관심분야〉
초고주파 공학, 전자파 수치해석



김 기 백

- 2010년 2월 충남대학교 전파공학과 (학사)
- 2012년 2월 충남대학교 전파공학과 (석사)
- 2012년 4월~현재 한국전자통신연구원 부설연구소 연구원

〈관심분야〉
건물구조 해석, 안테나



박 윤 미

- 2004년 2월 충남대학교 정보통신공학부 (학사)
- 2010년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (박사)
- 2010년 9월~2012년 4월 삼성전자 무선사업부 책임연구원
- 2012년 4월~현재 한국전자통신연구원 부설연구소 선임연구원

〈관심분야〉
전자파 수치해석, EMI/EMC, 고출력 전자기파



추 광 욱

- 1991년 2월 포항공과대학교 물리학과 (학사)
- 1993년 2월 포항공과대학교 전자공학과 (석사)
- 1993년 3월~1997년 2월 한국전자통신연구원 연구원
- 2001년 8월 한국과학기술원 전기전자공학과 (박사)
- 2002년 12월~현재 한국전자통신연구원 부설연구소 책임연구원 (실장)

〈관심분야〉
고출력 발생기술, RF 필터, EMI/EMC