

철근 콘크리트 구조 내 포설 케이블의 HEMP 결합 근사 해석 방법

Method for Approximated Analysis of HEMP Couplings to Cables in Reinforced Concrete

임형래 · 김우빈 · 김창균* · 손주항** · 정길수** · 육종관

Hyeong Rae Im · Woo Bin Kim · Chang-gyun Kim* · Ju Hang Sohn** · Kil Soo Jeong** · Jong Gwan Yook

요 약

전자전의 핵심 무기 체계 중 하나인 고출력 전자기파는 건물 내부에 침투하여 통신 및 전력 계통을 마비시킬 수 있으며, 민간 및 군사 시설에 대한 영향 분석 연구가 필요하다. 본 논문에서는 일반적인 전자파 full-wave 시뮬레이션으로 해석하기 어려운 크기의 건물 내부로 침투하는 고고도 전자파 펄스(HEMP)가 임의의 선로 종단에 유기시키는 전압에 대한 근사적인 해석 방안을 제시하였다. 건물 내부로 침투하는 전기장을 계산하기 위해 철근 콘크리트 다층 구조에 대한 등가 매질을 구현하고, 투과 및 반사 특성을 추출하고, E1 펄스가 실제 건물 내부에 침투한 후의 전기장의 세기를 계산하였다. 단위 전압원에 대한 종단 부하 전압을 계산하고, 침투 전기장에 의한 유기 전압을 도출하고 검증하였다.

Abstract

High-power electromagnetic fields, which are used as one of the core weapon systems in electronic warfare, can cause malfunctions in communication and power systems. Therefore, it is necessary to study their effects on civil and military facilities. In this paper, an approximated method for analyzing the voltage induced in a cable, placed inside a building, by HEMP was proposed. To calculate the electric field penetrating into the building, an equivalent medium for a multilayer reinforced concrete structure was implemented, and its transmission and reflection characteristics were obtained. The penetration level of the E1 pulse and the load voltage of the cable for unit voltage sources at each load were calculated. Subsequently, the coupling voltage was obtained and verified.

Key words: Electromagnetic Pulse(EMP), Cable Coupling, Reinforced Concrete, Equivalent Circuit Model

I. 서 론

전자파 펄스(electromagnetic pulse : EMP)는 현대 전자전의 핵심 무기 체계 중 하나이다. 이에 따라, 고출력 전자기파를 이용한 민간 및 군사 통신체계, 전력계통의 무

력화 및 방호 기술 연구는 국내 및 선진국의 전자파 연구 분야에서 계속해서 중요한 주제로 다루어지고 있다^{[1]~[5]}, EMP는 수 십 km 상공에서의 핵폭발로 인한 고고도 전자파 펄스 (High-altitude EMP : HEMP) 혹은 전자폭탄 등으로 발생시킬 수 있다. 고출력 전자기파가 영향을 미치는

「해당 연구는 국방과학연구소(UE191016ED) 주관의 핵 EMP 상황 하 케이블/안테나로 유도되는 전류 해석의 지원을 받아 수행됨.」

연세대학교 전기전자공학부(Department of Electric and Electronic Engineering, Yonsei University)

*(주)모아소프트(Moasoft, Inc.)

**국방과학연구소(Agency of Defense Development)

· Manuscript received April 29, 2020 ; Revised May 18, 2020 ; Accepted July 20, 2020. (ID No. 20200429-039)

· Corresponding Author: Jong Gwan Yook (e-mail: jgyook@yonsei.ac.kr)

경로 중 하나는 실외 안테나나 전력 공급을 위한 전신주 등에 전류를 유기시키는 경우(front-door coupling)이며, 다른 하나는 건물 내부로 침투하여 전자 장비 및 신호선 등을 손상시키는 경우(back-door coupling)이다.

EMP로 인한 손상은 각 상황에 노출되어 있는 전자 장비 및 내부 PCB, 전선 등의 모델링 후, 전자파 시뮬레이션을 통해 분석할 수 있다. 잘 알려진 full-wave 해석 방법으로 유한요소법(finite element method : FEM), 유한차분 시간영역법(finite difference time domain : FDTD), 모멘트법(method of moment : MoM) 등이 있다. 하지만 full-wave 해석 방법을 그대로 적용할 경우, 건물을 구성하는 구조물과 내부 케이블을 한꺼번에 해석해야 하므로, 매우 오랜 시간이 걸리거나, 해석이 수렴하지 않는 문제가 발생한다. 이에 대한 대안으로 케이블의 전압 및 전류 유기를 해석하는 방법이 결합되어 사용되며, 대표적인 방법으로 FEKO 등에 적용된 전송선 행렬 (transmission line matrix: TLM) 기법^[6]이 있다. 하지만 TLM 기법이 적용된 상용 시뮬레이션 프로그램을 이용한 해석의 경우, 전자 장비 및 자동차 등의 EMC 시험 조건과 같이, 기준이 되는 접지 평면과 해석 주파수 기준으로 일정 거리 이하로 떨어진 환경에만 적용이 되는 등, 제약 조건이 많다.

본 논문에서는 Electromagnetic Topology(EMT)^[7]에 근거하여, back-door coupling 환경인 건물 내부 침투 전기장의 선로 결합으로 인한 유기 전압을 근사적으로 해석하는 방안을 제시하였다. 먼저 건물을 구성하는 철근 콘크리트로 인한 전기장 침투 정도 해석을 위한 등가 매질을 구현하였다. 다음으로 건물 내부에 포설된 케이블에 대한 등가 회로 모델링을 수행하였다. 마지막으로 침투 전기장 및 등가 회로를 이용하여 중단 부하의 유기 전압을 해석하였다. 이 방법을 통해 구조적인 제약없이 건물 내부 케이블에 대한 전자기파 결합을 해석할 수 있다.

II. 건물 및 내부 선로 구조 모델링

2.1 철근 콘크리트 등가 모델링

건물 외벽과 내벽의 대부분을 구성하는 철근 콘크리트는 금속 격자로 구성되는 철근과 콘크리트의 다층 구조로 구성된다. 철근 콘크리트의 실제 구조를 모델링하여

수 십 m 이상의 건물 해석에 적용할 경우, 계산을 위한 CPU 및 메모리 자원이 굉장히 많이 필요하다. 이러한 해석 차원의 문제를 해소하기 위해서, 철근 콘크리트 구조를 이루는 철근 격자구조의 등가 매질화를 진행하였다. 철근 격자구조는 도선의 반경 및 도선 간 이격 거리에 따라 전파 투과 및 반사 특성이 달라지며, 이를 등가 표면의 면저항을 추출함으로써 구현할 수 있다^{[9],[10]}. 도선 격자를 임피던스 표면으로 등가화하였을 때, 인덕턴스는 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 ω 는 각 주파수, a 는 도선 중심축 간 이격 거리, d 는 도선의 지름을 의미한다. a_{eff} 는 이격 거리에 도선의 반경으로 인한 영향을 반영한 유효 이격 거리를 의미하며, α 는 그 영향을 반영하는 상수로서 본 논문에서는 그 값으로 0.05를 사용하였다(그림 1).

$$Z_{wiremesh} = j\omega L_{wiremesh} \quad (1)$$

$$L_{wiremesh} = \frac{\mu_0 a_{eff}}{2\pi} \ln(1 - e^{-\pi(d/2)/a_{eff}}) \quad (2)$$

$$a_{eff} = a - \alpha d \quad (3)$$

그림 2는 철근의 등가 표면 임피던스를 적용하여 계산된, 콘크리트-철근-콘크리트 다층 구조의 투과 및 반사계수를 나타낸다. 다층 구조의 투과 및 반사계수는 앞서 계산한 철근 격자구조의 등가 표면 임피던스와 콘크리트 매질의 ABCD 행렬을 각각 구한 후, 곱연산을 통하여 도출하였다. 여기에서 콘크리트의 유효 유전율은 4.5로 설정하였으며, 손실은 무시하였다. 투과 및 반사 계수에 대한 검증은 위해 FEKO 시뮬레이션을 통하여 동일한 다층 구조에 대한 특성을 얻고 비교하였다.

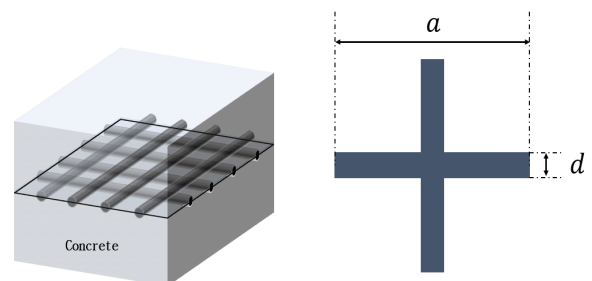


그림 1. 철근 콘크리트 다층 구조 및 철근 격자 구조
Fig. 1. Reinforced concrete and wire mesh structure.

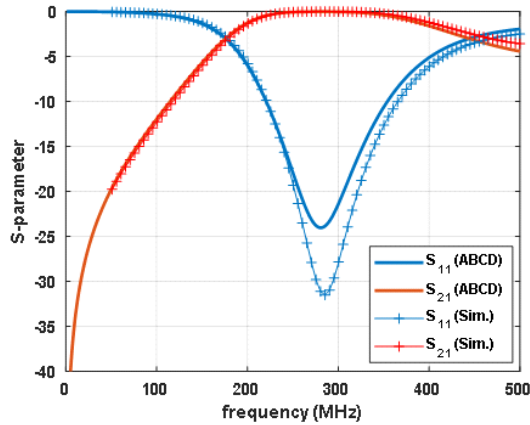


그림 2. 철근 콘크리트 3층 구조의 투과 및 반사 특성
Fig. 2. T/R characteristic of 3-layered reinforced concrete.

2-2 케이블 구조의 전자기파 결합 특성

건물 내부에는 여러 전자 장비에 전원을 공급하기 위한 도선과 안테나 신호를 전달하는 도선 등 그 기능에 따라 다양한 선로가 운용된다. 본 논문에서는 고출력 전자기파로 인한 전류 유입 현상을 분석하기 용이한 single-wire 및 two-wire 케이블 구조를 가정하였다.

이 케이블 구조는 전선의 제원과 신호선-접지선 간 거리에 따라 입력 임피던스가 달라지며, 입력 임피던스와 종단 부하 간 정합 여부에 따라 유입 전압 및 전류가 달라진다. 이를 분석하기 위해, 중심축 간 거리가 2 cm인 두 PVC 절연 전선으로 구성되는 two-wire 케이블의 E1 펄스가 입사하였을 때, 종단 부하에 따른 유입 전류를 해석하였다. 케이블의 제원은 그림 3과 같으며, 여기에서 E1 펄스의 전기장 편파는 두 도선이 이루는 평면에 나란하고, 각 도선을 수직으로 지나도록 설정하였다. E1 펄스의 형태는 식 (4)와 같으며, 여기에서 $k=1.3$, $E_0=5 \times 10^4$, $\alpha=4 \times 10^7$, $\beta=6 \times 10^8$ 이다.

$$E = kE_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4)$$

해석 결과는 그림 4와 같으며, 이를 통해 케이블의 입력 임피던스인 586 ohm 에 가까운 종단 부하를 가질수록, 더욱 큰 최대 유입 전압이 발생함을 확인할 수 있다. 반대로, 임피던스 간 차이가 클수록 최대 유입 전압의 크기는 작아지지만, 유입된 신호의 반사 신호들이 나타난다.

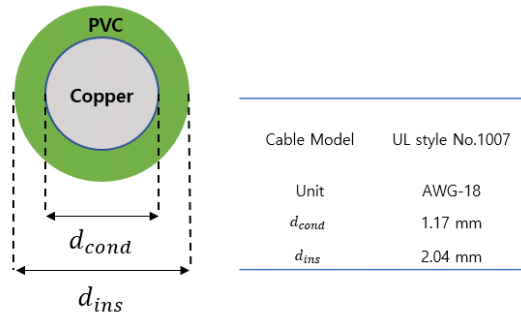


그림 3. 적용 PVC 절연 전선 제원
Fig. 3. Specification of PVC insulated wire.

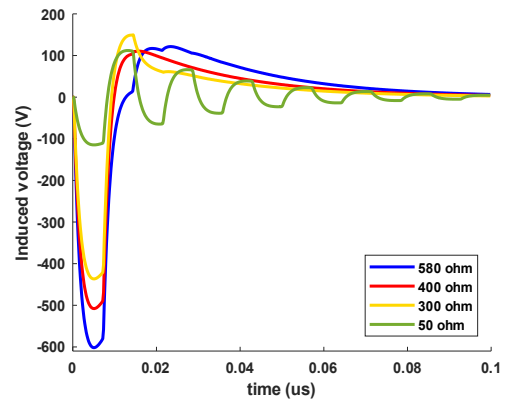


그림 4. 임피던스 정합 정도에 따른 종단 부하 유입 전압
Fig. 4. Coupling voltage for some different impedance matching condition.

2-3 Single-Wire 선로의 등가 선로 모델링

Single-wire 선로를 비롯한 전송선로는 그 산란계수 특성으로부터 등가 RLGC 변수를 추출할 수 있다^[11]. 본 논문에서는 그림 5와 같이 대표적인 전자기파 선로 결합 모델인 Agrawal 선로 결합 모델을 적용하였다^[12]. 산란계수와 RLGC 값 간의 관계식은 식 (5)~식 (8)과 같다^[13]. 건물 내부 선로에 발생하는 유입 전압을 계산하기 위해 사용된 single-wire 케이블의 접지면과의 거리는 1 cm로 설정하였으며, 등가 RLGC 변환을 통해 얻은 인덕턴스와 커패시턴스는 표 1과 같다. 여기에서 저항 및 컨덕턴스는 그 크기가 무시할 수 있을 정도로 작아, 계산에 적용하지 않았다.

$$e^{-\gamma l} = \frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \pm K \quad (5)$$

$$K = \left\{ \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1)^2 - (2S_{11})^2}{(2S_{21})^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$Z^2 = Z_0^2 \frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2} \quad (7)$$

$$R = \text{Re}\{\gamma Z\} \quad (8-a)$$

$$L = \text{Im}\{\gamma Z\} / \omega \quad (8-b)$$

$$G = \text{Re}\{\gamma / Z\} \quad (8-c)$$

$$C = \text{Im}\{\gamma / Z\} / \omega \quad (8-d)$$

표 1. 접지면으로부터의 높이가 1 cm인 케이블의 등가 인덕턴스와 커패시턴스

Table 1. The equivalent inductance and capacitance of a single-wire when the height of wire is 1 cm.

Parameter	L'	C'
Value	717.2 nH	15.5 pF

Ⅲ. 건물 내부 선로 유기 전류 분석

건물 내부 침투 전기장의 케이블 종단 부하 유기 전압 해석에 대해 본 연구에서 제안하는 근사 해석 과정은 그림 6의 순서도와 같다. 첫째 단계로, HEMP E1 펄스의 시간 영역 특성의 모델링을 통해 인가할 전파원을 정하고, 시간 및 주파수 영역 특성을 얻는다. 다른 한편으로, 건물을 이루는 철근 콘크리트 다층 구조를 정하여, ABCD 행렬 곱연산에 따라 다층 구조의 주파수에 따른 투과 및 반

사 특성을 얻는다. 여기서는 E1 펄스의 대부분의 주파수 성분이 있는 500 MHz 이하의 성분을 투과 및 반사 특성으로서 고려하였다. 두 번째 단계로, E1 펄스의 주파수 특성과 철근 콘크리트 다층 구조의 투과 특성을 곱하여, E1 펄스의 건물 내부 침투 크기에 대한 주파수 특성을 얻는다. 세 번째로, 케이블 구조에 대한 RLGC 등가 모델링을 수행하고, advanced design system(ADS) 회로 시뮬레이션을 통해 단위 전압이 각 종단에 인가될 때 종단 부하에 걸리는 전압을 계산한다. 마지막으로, 침투 전기장의 주파수 특성과 단위 전원에 대한 케이블 특성을 곱하고, IFFT를 적용하여 최종적인 시간 영역 유기 전압 및 전류를 계산한다. 이 때, 주파수 영역에서의 연산 과정으로 인해 IFFT를 취할 경우, 발생하는 causality 문제를 해결하기 위해 Hilbert 변환을 이용한 보정을 수행한다.

제시하는 방법의 적용 예시로, 그림 7과 같은 철근 콘크리트 다층 구조 내부의 Single-wire 케이블에 유기되는 전류에 대한 계산을 수행하였다. 단, 여기서는 간단한 검증을 위해서 철근 콘크리트 구조의 가로, 세로 및 높이는 무한하다고 가정하였으며, 적용한 다층 구조는 그림 2와 동일한 특성의 3층 구조로 설정하였다. 입사하는 E1 펄스는 전기장의 편파가 접지면에 수직이 되도록 설정하여, 가장 큰 전압 및 전류 유기가 발생하도록 하였다. 케이블 구조의 RLGC 모델값은 표 1과 같도록 하였으며, 구조는 그림 8과 같이 설정하였다. 또한, 제시하는 방법의 결과에 대한 비교 검증을 위해, ADS 대신 FEKO 케이블 시뮬레이션을 이용하여 같은 구조를 해석하였다.

그림 9는 철근 콘크리트 구조 내부로 침투한 전파의

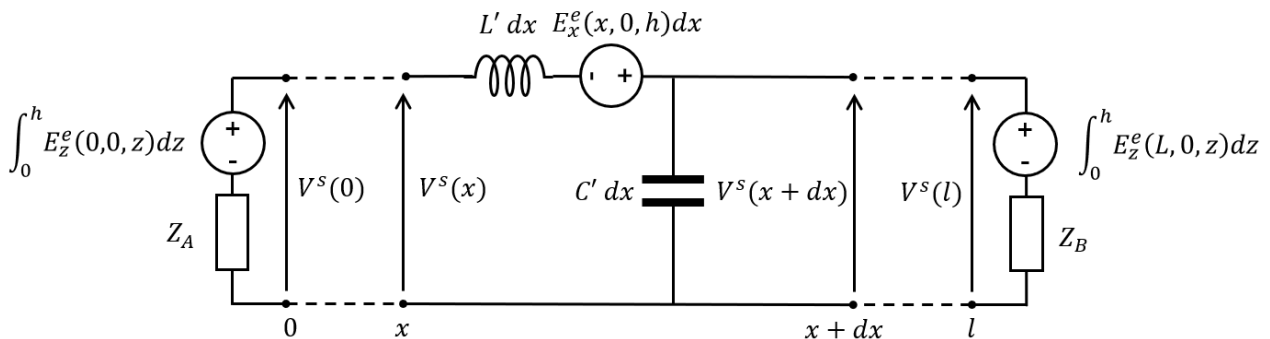


그림 5. Agrawal 선로 결합 모델

Fig. 5. Agrawal's cable coupling model.

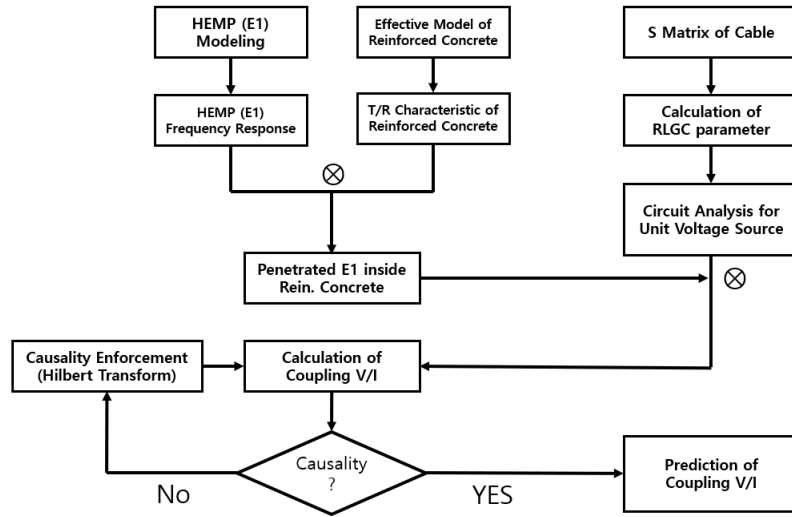


그림 6. 건물 내부 포설 선로 결합 해석 순서도
Fig. 6. Procedure of cable coupling analysis inside building.

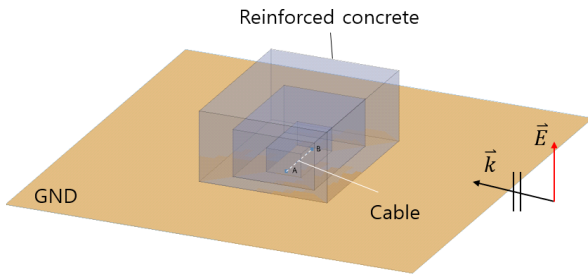


그림 7. 건물 내부 선로 포설 환경
Fig. 7. Setup for indoor cable.

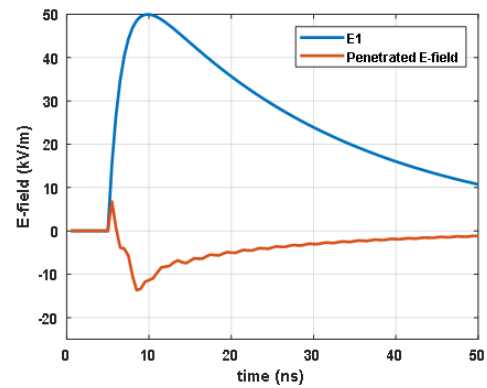


그림 9. 건물 내부 침투 전기장
Fig. 9. The electric field penetrated into building.

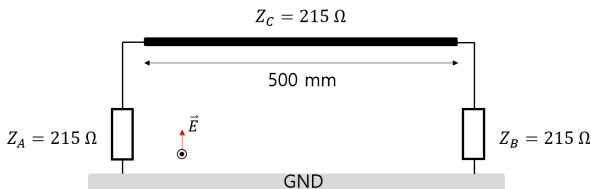


그림 8. 건물 내부 선로의 구성
Fig. 8. Structure of indoor cable.

세기를 E1 펄스와 비교하여 시간 영역에서 나타낸 것이다. 그림 10은 그림 8의 케이블 종단에 각각 1 V의 전압원이 인가되었을 때, 부하에 걸리는 전압을 나타낸 것이다. 그림 11에서 ADS 회로 해석을 적용한 경우와 FEKO

시뮬레이션을 적용한 경우의 최종적인 시간 영역 종단 유기 전압의 해석 결과를 비교하여, 교차 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고출력 전자기파가 건물 내부에 침투하였을 때, 내부 전자 장비 및 통신 시스템에 영향을 미치는 경로 중 하나인 케이블 유기에 대해 근사적으로 분석하는 방안에 대해 제안하였다. 건물을 콘크리트-철근-콘크리트의 3층 구조로 가정하고, 격자 구조를 가지는 철근의

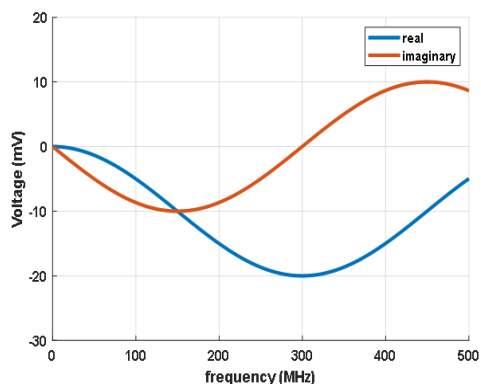


그림 10. 각 종단에 단위 전압원 인가 시 종단 부하에 걸리는 전압

Fig. 10. Load voltage for unit voltage sources at each load.

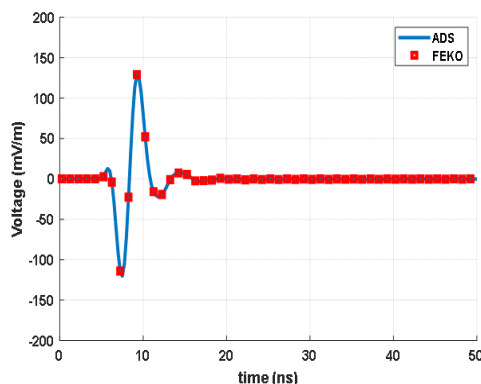


그림 11. 건물 내부 single-wire 케이블 종단 부하 유기 전압 비교

Fig. 11. Coupling voltage at load of single-wire cable in a building.

등가 표면을 모델링하여 그 투과 및 반사 특성을 계산하였다. 철근 콘크리트의 투과 특성을 이용하여, 실제 HEMP가 입사하였을 때의 침투 전기장을 계산하였다. 다음으로, 건물 내부에 운용되는 케이블을 모델링하여, 산란계수 특성으로부터 그 등가 RLGC 값을 추출하였다. 마지막으로, 건물 내부에 임의의 위치에 케이블이 포설된 상황을 가정하여, 종단 시스템에 유기될 수 있는 최대 전압을 등가 회로 모델을 이용하여 도출하였다.

이 방법은 상용 full-wave 시뮬레이션을 이용하여 계산할 수 없는 큰 건물에 대한 EMP 영향 해석을 가능하게

한다. 또한, full-wave 시뮬레이션 프로그램에 탑재된 케이블 해석 기법을 사용할 수 없는 환경에 대해서도 해석할 수 있다. 하지만 실제 건물은 6면이 모두 막힌 공동 구조로 되어있다. 그러므로 좀 더 정확한 유기 전압 및 전류 해석을 위해서는 구조에 따른 공진 특성을 반영한 내부의 전기장을 반영할 필요가 있다. 그리고 건물 내부에 포설된 선로의 경우, 실제 운용되는 다양한 케이블의 산란 행렬을 파악할 수 있다면, 등가 회로 설계를 통해 이 방법에 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 추가 연구도 수행할 예정이다.

References

- [1] S. Y. Hyun, J. K. Du, H. J. Lee, K. W. Lee, J. H. Lee, and C. Jung, et al, "Analysis of shielding effectiveness of reinforced concrete against high-altitude electromagnetic pulse," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, pp. 1488-1496, Dec. 2014.
- [2] H. Xie, J. Wang, Y. Li, S. Li, C. Xuan, and Y. Wang, "Electromagnetic topology analysis of external pulses interaction with shielded cables using spice models," *Progress in Electromagnetic Research B*, vol. 51, pp. 119-133, 2013.
- [3] M. Paolone, F. Rachidi, A. Borghetti, C. A. Nucci, M. Rubinstein, and V. A. Rakov, et al., "Lightning electromagnetic field coupling to overhead lines: Theory, numerical simulations, and experimental validation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 532-547, Aug. 2009.
- [4] S. Y. Hyun, K. W. Lee, M. S. Kim, and J. G. Yook, "Electromagnetic modeling of shielding effectiveness of reinforced concrete walls," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 3, pp. 384-391, Mar. 2021.
- [5] A. Reineix, A. Boijaud, and B. Jecko, "Electromagnetic pulse penetration into reinforced concrete buildings," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 29, no. 1, pp. 72-78, Feb. 1987.

- [6] W. J. R. Hofer, "The transmission-line matrix method: Theory and applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 33, no. 10, pp. 882-893, Oct. 1985.
- [7] F. M. Tesche, "Topological concepts for internal EMP interaction," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-20, No 1, pp. 60-63. Feb. 1978.
- [8] J. G. Yook, J. G. Du, and S. Y. Hyun, "Electromagnetic coupling analysis of large structure using EM topology," *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 4, pp. 24-31, Jul. 2012.
- [9] S. Y. Hyun, I. Jung, I. P. Hong, C. Jung, E. J. Kim, and J. G. Yook, "Modified sheet inductance of wire mesh using effective wire spacing," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 58, no. 3, pp. 911-914, Jun. 2016.
- [10] K. F. Casey, "Electromagnetic shielding behavior of

wire-mesh screens" *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 30, no. 3, pp. 298-306, Aug. 1988.

- [11] F. Rachidi, "A review of field-to-transmission line coupling models with special emphasis to lightning-induced voltages on overhead lines," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 54, no. 4, pp. 898-911, Aug. 2012.
- [12] A. K. Agrawal, H. J. Price, and S. H. Gurbaxani, "Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 22, no. 2, pp. 119-129, May. 1980.
- [13] W. R. Eisenstadt, Y. Eo, "S-parameter-based IC interconnect transmission line characterization," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 15, no. 4, pp. 483-490, Aug. 1992.

임 형 래 [연세대학교/석박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4558-2780>



2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 전자기 수치해석, 전파 흡수 설계, EMP

김 창 균 [모아소프트/본부장]

<https://orcid.org/0000-0003-1464-6358>



1995년: 경남대학교 전자계산학과 (공학사)
 2009년: 충주대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
 2019년: 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)
 1994년~2001년: (주)CSI, Inc E-CAD 과장

2001년~2017년: (주)루틴테크놀로지 대표이사
 2017년~현재: (주)모아소프트 디지털융합사업부 본부장
 [주 관심분야] EMI/EMC/EMS, E3, ESD, SiP, SoP

김 우 빈 [연세대학교/석박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9109-2470>



2017년 2월: 한국항공대학교 전자및항공전자공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 전자기 수치해석, Near to Far Field Transformation, EMP

손 주 항 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7377-829X>



2005년 2월: 숭실대학교 컴퓨터학과 (컴퓨터학석사)
2007년 12월~2010년 7월: 국방과학연구소 연구원
2010년 7월~2012년 9월: 한국전자통신연구원 연구원
2012년 10월~현재: 국방과학연구소 선임

연구원

[주 관심분야] HEMP, 전자전, 시스템 통합 및 제어

육 중 관 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6711-289X>



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수 (공학박사)
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)

[주 관심분야] 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, EMI/EMC, HEMP, RF 바이오/가스센서 등

정 길 수 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7824-6914>



1999년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
2007년 3월: 토요하시기술과학대학교 전자정보공학과 (공학박사)
2007년 9월~2009년 9월: ATR 파동공학연구소 선임연구원
2009년 10월~2011년 10월: 한국전자통신

연구원 선임연구원

2011년 11월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 무선통신 신호처리, EMP