

다양한 케이블 변수에 따른 동축 케이블의 HEMP 결합 신호 해석

Analysis of HEMP Coupling Signal for a Coaxial Cable Considering Various Cable Parameters

조성희 · 노영훈 · 김창균* · 박용우** · 이동혁** · 정길수** · 육종관

Sunghui Jo · Yeong-Hoon Noh · Chang-gyun Kim* · Yong-Woo Park** ·

Dong-Hyeok Lee** · Kil-Soo Jeong** · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 EMP(electromagnetic pulse) 방호용 쉘터에 연결된 케이블에 HEMP(high-altitude EMP) 입사 시 유기되는 결합 신호를 다양한 케이블 변수에 따라 해석하였다. 쉘터 내부 기기에 전력을 공급하거나, 통신 신호 및 정보를 전송하는 등의 사용 목적에 따라 케이블의 구조적 조건 및 운용 환경이 달라진다. 케이블 등가 모델과 전자기 시뮬레이션을 통해 차폐층의 유무, 내부 심선 개수와 굵기, 차폐층의 편조 조건, 케이블의 길이, 접지 면으로부터의 높이, 차폐층의 입력단 접지 여부에 따라 케이블에 유기되는 결합 신호를 해석하였고, RG58 동축 케이블을 기준으로 케이블 변수에 따른 유기 전류를 비교 및 분석하였다.

Abstract

In this study, we analyze the coupled signal for various cable parameters when a high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) is incident on a cable connected to an EMP protection shelter. The structural conditions or operating environments vary depending on the purpose of use, such as to supply power or transmit communication signals to the internal devices of the shelter. Using the cable equivalent model and simulations, we interpret the coupled signal that is induced in the cable according to the presence or absence of a shielding layer, number and thickness of inner core wires, braiding conditions of the shielding layer, cable length, height from the ground plane, and whether the input terminal is grounded. We compare and analyze the induced current according to the cable parameters based on an RG58 coaxial cable.

Key words: HEMP(High-Altitude Electromagnetic Pulse), Coupling Signal, Shelter, Coaxial Cable, Induced Current, FEKO

I. 서 론

HEMP는 핵폭발이 발생할 때 방출되는 감마선이 대기

층의 공기 분자와 충돌 시 콤프턴 효과에 의해 생성된 전자가 지구의 자기장을 따라 나선 형태로 움직일 때 발생하는 고출력 전자기파이다. 이는 전자 장비 혹은 시스템

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

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

*모아소프트(Moasoftware)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received April, 29, 2020 ; Revised May, 18, 2020 ; Accepted June, 1, 2020. (ID No. 20200429-040)

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

전체에 원치 않는 동작이나 치명적인 고장, 파괴 등을 불러올 수 있기에 군사 시설뿐만 아니라, 주요 민간시설에도 방호 대책 수립이 필요하다^[1]. 이를 위해 HEMP 복사 및 전도 환경에 대한 전자 시스템의 방호 성능 평가 기준과 방법을 MIL-STD-188-125-1^[2] 및 MIL-STD-188-125-2^[3]에서 제안하고 있으며, EMP 방호 장치의 방호 성능을 차폐 효과(shielding effectiveness, SE) 성능, 펄스 전류 주입(pulsed current injection, PCI 시험), 위협 수준 조사(threat level illumination, TLI), 연속파 침잠(continuous wave immersion)의 항목에 대해 제시하고 있다^[4].

대표적인 방호 시설로는 쉘터와 같은 함체를 들 수 있으며, 목재와 골조 및 단열재로 이루어진 6개의 판넬을 EMI 가스켓, 전도성 실리콘을 통해 전기적으로 결합하여 SE 성능을 충족시킨다. 이를 통해 쉘터 내부의 전자 장비들을 HEMP의 직접적인 결합으로부터 보호할 수 있다. 하지만, 내부 장비에 전력을 공급하거나 통신 신호 및 정보를 송·수신하기 위해 필연적으로 전원 인입반(power point of entry, Power POE) 및 신호 인입반(signal point of entry, Signal POE)을 통한 쉘터 내·외부의 연결이 발생하기 때문에 외부 케이블에 유기된 HEMP 결합 신호는 내부 기기에 심각한 피해를 일으킬 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 인입반에 HEMP 필터를 배치해 외부 케이블을 통해 쉘터 내부로 유기되는 전류를 특정 값으로 고정(clamping)하는 기술이 이용되고 있으며^[5], 필터의 PCI 성능 시험과 시간 영역 수치해석 알고리즘(FDTD)을 이용한 HEMP 결합 신호 계산 등의 연구가 수행되고 있다^{[6]~[8]}. 그러나 기존의 연구는 단순한 케이블 모델의 결합 신호 해석에 집중하고 있으며, 시간영역 해석을 위해서는 복잡한 케이블의 CAD 모델 구현이 필요하고, 해석 결과의 정확도를 확보하기 위해 막대한 계산 자원이 필요하다. 또한, 케이블의 특성 및 종류에 따라 유기되는 HEMP 결합 펄스 신호의 양상이 달라지므로 실제 방호 장비에 운용하는 케이블을 분석하는 데에 한계가 있다.

본 논문에서는 다양한 케이블의 구조적 조건 및 운용 상황에 따른 HEMP 결합 전류 신호의 경향성을 제시한다. 관심 대상인 케이블 해석 상황을 설정하고 유기 전류를 계산하기 위한 이론적 배경과 해석 방법을 설명하였

다. 가장 대표적으로 활용되는 동축 케이블의 구조적 조건(차폐층의 유무, 내부 심선 개수와 굵기, 차폐층의 편조 조건) 및 케이블 운용 조건(케이블 길이, 접지면으로부터의 높이, 입력단 접지 여부)에 따라 결합 신호의 침투치 및 펄스폭을 비교하였고, 쉘터 인입반으로 유기되는 전류를 최소화하기 위한 케이블 조건을 제안하였다.

II. HEMP 결합 및 이론적 배경

2-1 HEMP 방호 시설 및 외부 케이블 유기 전류

전자 장비를 HEMP로부터 보호하기 위해 전자파를 물리적으로 차단하는 기술로서, 전도성 물질로 구성된 철관으로 전자 장비 및 시설물을 둘러싸는 차폐 기술(EMP 방호 쉘터)이 사용된다. 그림 1(a)는 통신 장비를 보호하는 신호 쉘터의 외부와 내부를 나타낸 것이다. 육면체의 폐공간을 생성하여 외부 전자파의 직접적인 침투를 막으며, 수십 dB의 차폐 효과(shielding effectiveness, SE)를 가지므로 고출력 전자기파에 의한 전자 장비의 성능 저하 또는 작동 불능 문제를 방지할 수 있다. 하지만 쉘터 내부의 전자 장비에 전력을 공급하기 위한 전력선(그림 1(b)의 파란색 15 m 케이블), 유·무선 통신 장비로부터 통신 신호(그림 1(b)의 파란색 5 m 케이블)가 이동하는 신호선 등이 외부로 노출되어 있어, 케이블에 유기된 높은 결합 전류가 이를 통해 쉘터 내부 장비로 들어가 심각한 피해를 초래할 수 있다.

이를 방지하기 위해 쉘터의 내, 외부를 연결하는 전력 및 신호 인입반(point of entry, POE)의 다음 단계 서지 보호기(surge protector) 및 EMP 필터를 배치하여 고출력 유기 신호를 억제(clamping)한다. 이때, POE로 유기되는 입력 전류의 특성에 따라 방호 장치의 종류나 성능이 달라지므로 사전에 전도성 HEMP 신호인 결합 전류의 침투치, 펄스폭 등의 특성 인자를 확보할 필요가 있다.

그림 1(c)는 HEMP 결합 신호가 외부 케이블을 따라 쉘터 내부의 필터로 인가되는 시스템을 나타낸 모식도이다. 결합 신호를 HEMP 신호의 주파수 대역폭을 가진 가상 AC 전원으로 모델링할 수 있고, 케이블을 따라 순시 펄스 신호가 전송되는 과정으로 등가화한다. 외부 케이블은 전력선, 신호선으로 주로 사용되는 동축 케이블이며,

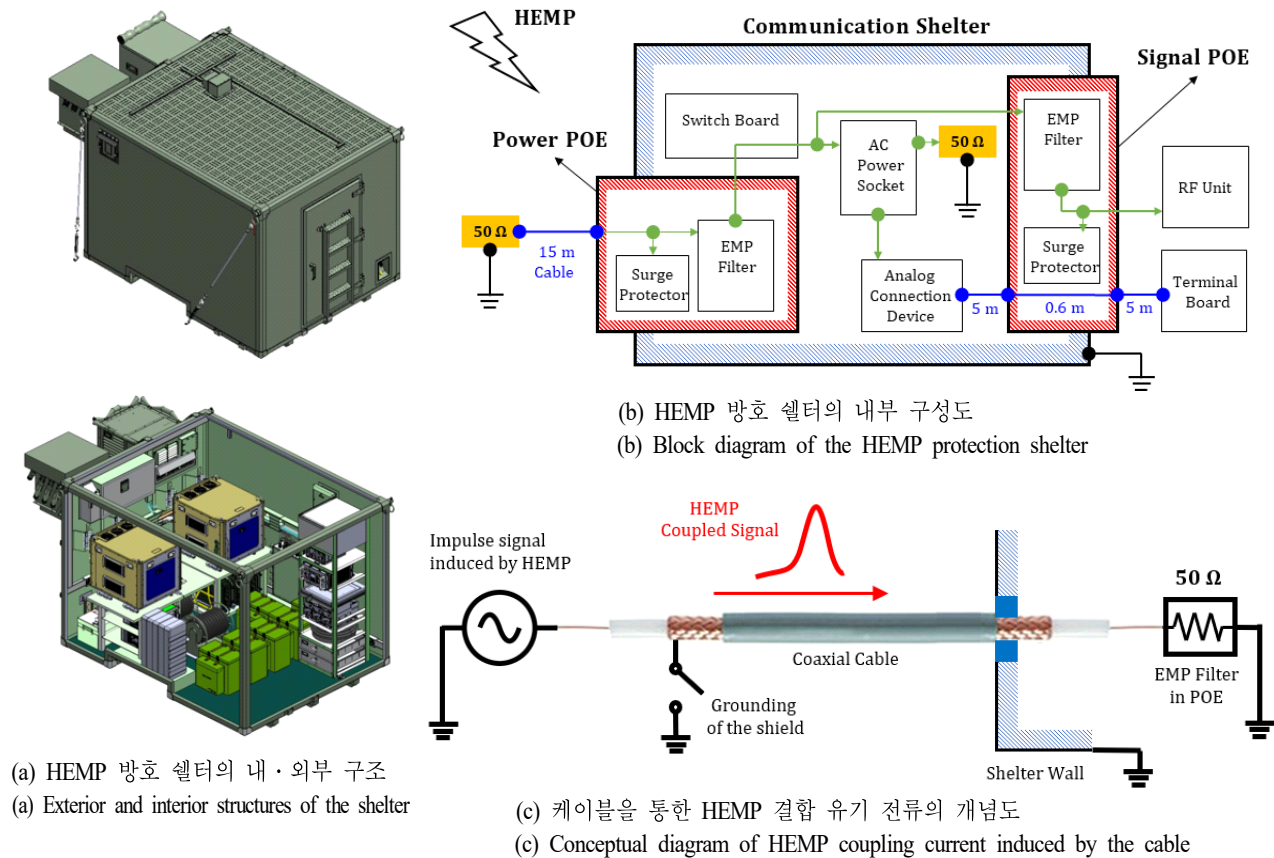


그림 1. HEMP 방호 장치(셸터)의 구조 및 외부 케이블을 통한 HEMP 결합 유기 전류의 개념도^[9]

Fig. 1. Exterior and interior structures of the shelter and conceptual diagram of generation process of HEMP coupling current induced by external cable^[9].

심선의 양 끝은 각각 50 Ω으로 정합된 부하에 연결되어 있다. 동축 케이블의 경우, 심선이 차폐층으로 감싸져 있고, 차폐 성능에 따라 심선에 유기되는 결합 신호의 세기 및 파형에 영향을 미친다. 이때, 셸터의 벽에 연결된 케이블 차폐층 끝단은 접지되어 있는 상황을 가정할 수 있고, 반대쪽 끝단의 접지 여부에 따라 결합 신호 특성이 달라질 수 있다.

2-2 절에서는 본 절에서 다룬 외부 케이블에 유기되는 결합 전류에 대한 이론적인 접근을 제시한다. 그림 1(c)에 나타난 모식도를 토대로 HEMP 등가 전원 및 전송선로 모델링을 진행하며, POE로 인가되는 전류에 영향을 미치는 케이블의 설계 요인을 탐색한다.

2-2 HEMP 펄스 주입 시 케이블의 파라미터 분석

동축 케이블의 HEMP 결합 신호 해석을 위한 무손실 전송선로 등가 모델은 그림 2와 같다. 인입반 지점에 방호 장치를 장착하기 위해 인입반에 해당하는 $Z_0 (=50 \Omega)$ 부하에서의 유기 전류를 해석하였으며, 전송선은 접지면(무한도체 평면)으로부터 수직 방향(z 방향)으로 h 만큼 떨어져 있다. 일반적으로 차폐층은 케이블의 유연성을 위해 편조 형태로 되어 있어 외부 전자기파가 일부 내부 심선에 영향을 주게 된다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 이상적인 도체로 이루어진 차폐층에 유기되는 전류 분포 $I(x)$ 및 전압 성분 $V^s(x)$ 을 계산한 후에 이에 의해서 내부 심선에 발생되는 전압 강하 $V_i^s(x)$ 와 총 전류 $I_t(x)$ 를 계산

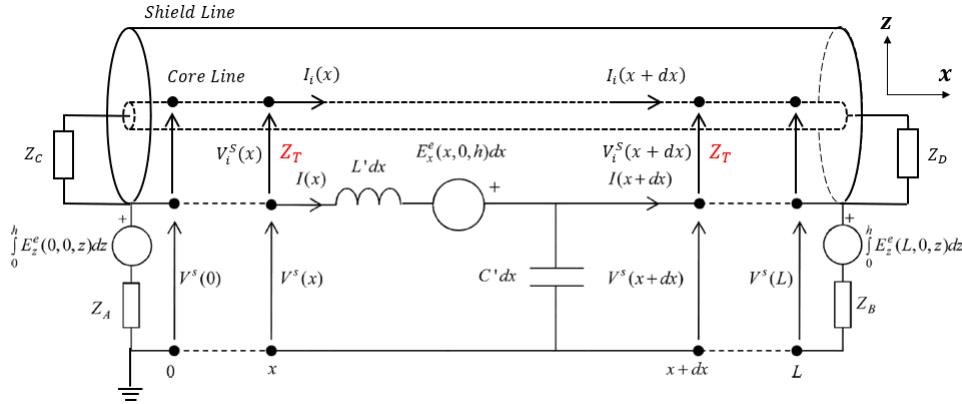


그림 2. HEMP 입사 환경에서 접지면 위에 놓인 동축 케이블에 대한 회로도

Fig. 2. Circuit configuration of coaxial cable above a ground plane in HEMP-incidence condition.

한다^{[10],[11]}. 차폐층에 유기되는 결합 신호는 Agrawal 회로 모델^[12]을 이용해 구할 수 있으며, 입사되는 전자기파에 대한 전기장-전송선로 변환 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dV_i^s(x)}{dx} + j\omega L' I(x) &= E_x^e(x, 0, h) \\ \frac{dI(x)}{dx} + j\omega C' V^s(x) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$V_i^s(x)$, $I(x)$ 는 각각 입사파에 의해 발생하는 분산 전압 및 전류를 의미하고, L' , C' 은 전송선로 이론에서 등가화된 인덕턴스, 커패시턴스 성분이다. $E_x^e(x, y, z)$ 는 특정 좌표에서 관측된 입사 전계의 x 성분이고, ω 는 입사파의 각주파수이다. 이때, 식 (2)의 경계값 조건을 이용해 임의의 위치 x 에서의 전압, 전류를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_i^s(0) &= -Z_A I(0) + \int_0^h E_z^e(0, 0, z) dz \\ V_i^s(L) &= Z_B I(L) + \int_0^h E_z^e(L, 0, z) dz \end{aligned} \quad (2)$$

Z_A , Z_B 는 각각 차폐층의 신호 입력단 및 인입반 등가 임피던스로, Z_B 는 접지되어 0 Ω 이다. 식 (1), (2)로부터 차폐층과 접지면 사이의 전압 $V^s(x)$ 와 전류 $I(x)$ 에 의해 생성되는 동축 케이블 내부 심선의 분산 전압 $V_i^s(x)$ 및 전류 $I_i(x)$ 를 계산할 수 있다^{[10], [13]}.

$$\begin{aligned} V_i^s(x) &= Z_T I(x) \\ I_i(x) &= Y_T V^s(x) \end{aligned} \quad (3)$$

$V_i^s(x)$, $I_i(x)$ 는 각각 내부 심선에 유도되는 분산 전압 및 전류를 의미하고, Z_C , Z_D 는 각각 심선의 신호 입력단 및 인입반 종단 임피던스이다. Z_C , Z_D 는 50 Ω 으로 정합되어 있다. Z_T 는 전달 임피던스로, 차폐층과 내부 심선의 전압 및 전류 관계를 매개하는 변수이다. 편조 차폐 동축 케이블의 전달 임피던스는 식 (4)와 같이 정의된다^[10].

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{1}{\sigma \pi r_{bw}^2 B W \cos(\theta_w)} \frac{\gamma 2 r_{bw}}{\sinh(\gamma 2 r_{bw})} \\ \gamma &= \frac{1 + j1}{\delta} \end{aligned} \quad (4)$$

σ 는 도전율이고, r_{bw} 는 편조 차폐층의 반지름, B 는 편조 차폐층의 캐리어 수, W 는 캐리어 당 필라멘트 수를 의미한다. γ 는 전파 상수이고, δ 는 차폐층 도체의 표피 깊이(skin depth)이다. 이를 이용해 식 (5)와 같이 내부 심선 양 끝단의 부하 임피던스에 작용하는 전압 및 전류 값을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_i^s(0) &= Z_T I(0) - Z_C I(0) \\ I_i(0) &= Y_T V^s(0) \\ V_i^s(L) &= Z_T I(L) + Z_D I(L), \\ I_i(L) &= Y_T V^s(L) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (2)~식 (5)를 통해, 본 논문에서 얻고자 하는 인입반 부의 심선 전류 $I_i(L)$ 은 L' , C' , Z_T , Z_A 에 의해 결정되며, 이 파라미터들을 조정하여 전류의 세기, 전류 신호

의 순시적 특성 등을 조절할 수 있다. L' , C' 은 케이블의 차폐층과 접지면 사이에 발생하는 성분이고, 케이블의 길이 또는 케이블과 접지면 사이의 높이에 따라 달라진다. Z_T 는 차폐층의 유무 및 편조 조건(식 (4))에 따라 달라지고 Z_A 는 차폐층의 입력단 접지 여부에 따라 결정된다. 이외에도 심선의 개수 및 굵기에 따라 내부 심선에 유도되는 분산 전압 및 전류가 달라진다.

3장에서는 본 절에서 이론적으로 분석한 결과를 토대로, 케이블의 유기 전류에 영향을 미치는 파라미터인 차폐층의 유무, 심선의 개수 및 굵기, 차폐층 편조 조건, 케이블 길이, 접지 면으로부터의 높이, 입력단 차폐층 접지 여부에 따른 심선의 HEMP 결합 신호의 변화를 해석하였다. 이를 통해 인입반 부위에 입력되는 유기 전류를 분석하고, 최적의 방호 성능을 내기 위한 케이블 구조를 제시하였다.

III. 케이블 결합 신호 해석 결과 및 분석

3-1 외부 케이블 결합 신호 해석 방법

다양한 케이블 파라미터를 통해 HEMP 결합 신호를 해석하기 위해서 상용 소프트웨어인 FEKO의 케이블 톨 옵션을 이용하였다. FEKO의 경우, 주파수 영역 해석 알고리즘을 이용하여 설정한 대역폭에 대한 주파수 영역 결과를 도출하므로 인과성을 만족하는 시간 영역 케이블 결합 유기 전류를 계산하기 위해 MATLAB 코드를 작성하였다. 그림 3은 케이블 해석 과정을 나타낸 개념도이다.

케이블의 길이, 접지 평면으로부터의 높이, 케이블 위치 등의 정보가 정해지면 그에 맞춰 그림 4(a)의 선분 \overline{AB} 와 같이 CAD 모델을 생성하고, 케이블 톨 옵션을 이용해 케이블 단면 정보(심선, 유전체층, 차폐층)와 케이블 말단의 종단 정보를 설정한다. 해석을 진행하면 케이블의 구조적 정보에 대해 MoM 기반 full-wave 해석을 우선 수행하고, 그 결과로부터 Transmission line matrix(TLM) [14],[15]방식의 전송선로해석을 수행해 2-2절과 같이 케이블의 단면 정보를 고려한 결과를 도출한다. 상용 소프트웨어를 통해 도출한 결과는 전계 세기가 1 V/m인 입사파에 대한 주파수 영역 결과이고, HEMP의 파형 정보를 곱한 후, 푸리에 역변환(Inverse Fourier Transform)을 통해 시간

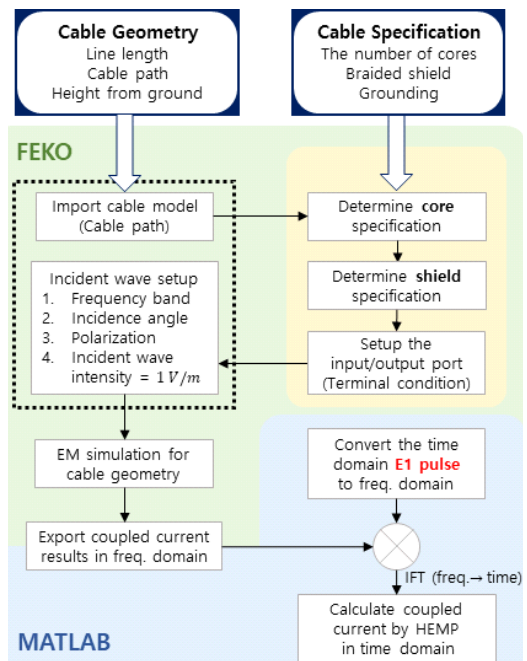


그림 3. 해석 방법의 개념도

Fig. 3. Conceptual diagram of analysis method.

영역 결과로 변환하여 최종적으로 HEMP에 의한 케이블 결합 신호를 계산한다.

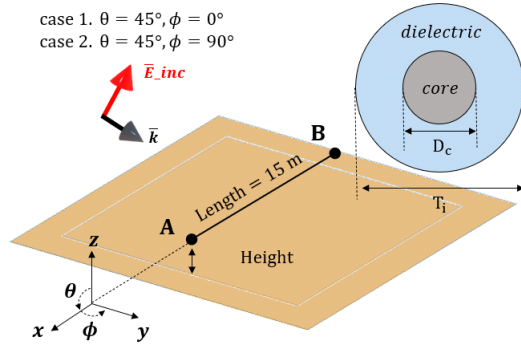
시간 영역 전자파 수치해석 알고리즘을 사용할 경우, 실제 케이블의 모든 구조를 CAD 모델로 구현해야 하고, 정확도 확보와 충분한 시간 범위의 결과를 내기 위해서 무수히 많은 계산 자원이 필요하다. 반면에 본 방법을 사용하면, 정확도는 유지한 상태에서 계산 시간을 줄이고, 다양한 경우에 대해 손쉽게 시뮬레이션할 수 있다.

3-2 케이블 조건에 따른 유기 전류 해석 결과

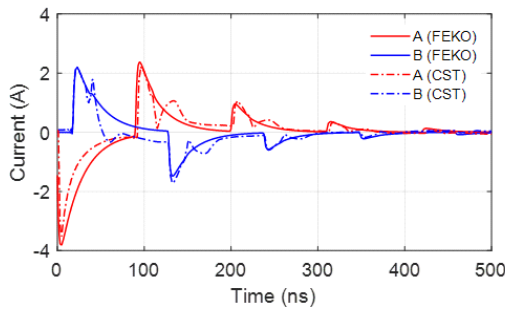
시뮬레이션에는 HEMP 신호 중 펄스폭이 높아 가장 위협적인 E_1 펄스를 입사파로 사용하였고, 수식적으로 다음과 같이 이중 지수 함수로 나타낸다[16],[17].

$$E_1(t) = E_0 k \times \left(e^{-\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) [\text{V/m}] \quad (6)$$

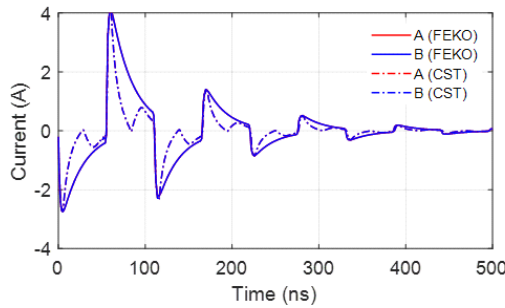
E_0 는 침투치 값으로, 50 kV/m이고, k 는 비례 계수로 1.3이다. τ_1 , τ_2 는 이중 지수 함수의 시간 상수이며, 각각 25 ns, 5/3 ns의 값을 가진다. 시간 영역 및 주파수 영역



(a) 단일 도선의 단면 및 시뮬레이션 환경
(a) Cross-section and simulation condition for a single wire



(b) Case 1에 대한 유기 전류 해석 결과
(b) Coupling currents for the case 1



(c) Case 2에 대한 유기 전류 해석 결과
(c) Coupling currents for the case 2

그림 4. 단일 도선의 해석 조건 및 결과
Fig. 4. Analysis setup and results of a single wire.

E_1 펄스는 그림 5와 같다.

3-2-1 차폐층이 없는 단일 도선 및 동축 케이블의 유기 전류 비교

HEMP 결합 신호의 경향성 및 해석 정확도를 파악하기

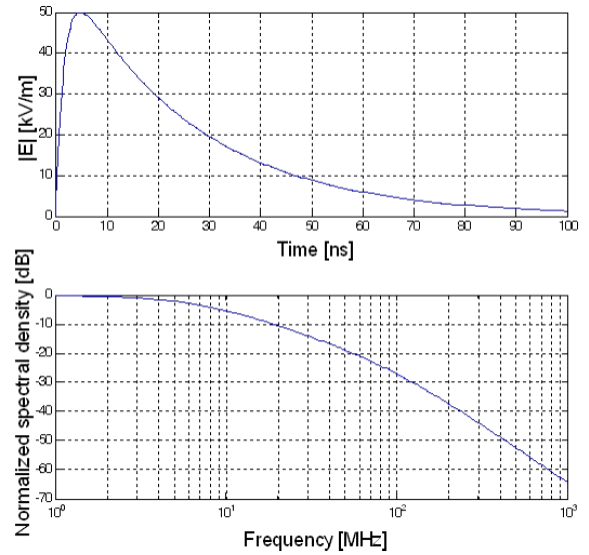


그림 5. 시간 축과 주파수 축에서의 E_1 펄스^[4]
Fig. 5. E_1 pulse in time- and frequency-domain^[4].

위해 차폐층이 없는 단일 도선을 해석하였다. EMP 유기 실험 환경을 토대로 시뮬레이션을 진행했으며, 그림 4(a)와 같이 길이 15 m의 케이블이 접지면으로부터 1 cm 떨어진 조건이며, A지점에 케이블 입력단 임피던스(Z_C)를, B지점에 인입반 임피던스(Z_D)를 설정하였다. 케이블 단면은 코어 심선과 유전체층으로 구성되어 있으며, 심선은 지름 D_c 가 0.9 mm (반지름 0.45 mm)인 구리선이고, 유전체층은 폴리에틸렌($\epsilon_r=2.25$, $\tan \delta=0.0004$)으로 이루어진 두께 1.025 mm 층이다. 입사각은 케이블에 나란한 경우(case 1. $\theta=45^\circ$, $\phi=0^\circ$)와 케이블에 수직하게 입사되는 경우(case 2. $\theta=45^\circ$, $\phi=90^\circ$)에 대해 해석하였다.

그림 4(b), (c)는 각각 해석 정확도를 교차 검증하기 위해 시간 영역 해석 기반 소프트웨어 CST의 결과와 본 논문에서 이용한 FEKO의 해석 결과를 비교한 것이다. 시간 영역 응답과 주파수 영역 응답의 변환 과정에서의 샘플링 오차에 의해 결과 차이가 존재하지만, 침투치와 상승 및 하강시간에 대해서는 동일한 경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)에서 볼 수 있듯이, 케이블과 나란한 방향으로 입사되는 경우, 입사 전계의 z 방향 성분에 의해 전류가 유기되고, A지점에서 -x 방향으로의 전류가 먼저 발생하고, 입사파가 A지점을 지나 B지점으로

가는 동안의 시간 후에 B지점에서 +x 방향으로의 전류가 발생한다. 반면에, 그림 4(c)에서는 전계가 케이블과 수직한 방향으로 입사되므로, 이 경우 $x=0$ 인 평면에 대해 대칭 구조이기 때문에 A지점과 B지점의 결과가 동일하다. 두 경우 모두 케이블 양단이 50 Ω 에 정합되어 있지 않아 반사파가 발생하며, 시간이 지남에 따라 점차 0 A에 수렴한다.

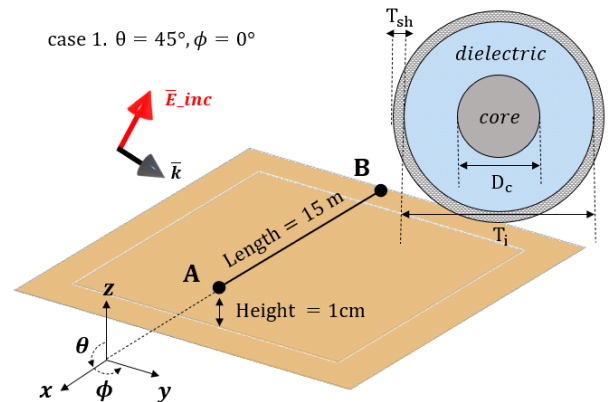
동축 케이블에서 case 2의 경우, 공진에 의한 영향이 크게 나타나 주기 신호가 유기되어 전류가 0 A로 수렴하는 데에 오랜 시간이 걸리기에 펄스폭을 비교하기에 무리가 있다. case 1의 경우와 case 2의 경우 모두 침투치의 증감 비율은 동일하게 나타난다. 이에 따라, 유기 전류의 침투치와 펄스폭을 모두 비교하기 위해 이후 시뮬레이션은 case 1으로 진행하였다.

2-2절에서 분석한 유기 전류 신호에 영향을 주는 케이블 파라미터 중 차폐층에 의한 요인을 검증하기 위해 그림 6(a)와 같이 차폐층을 추가하였다. 동축 케이블은 주로 이용되는 RG58 케이블의 제원(표 1)을 활용했다. 차폐층의 두께 T_{sh} 는 0.325 mm이며, 이외의 케이블 제원이나 시뮬레이션 조건은 앞선 차폐층이 없는 경우와 동일하다. 그림 6(b)는 케이블과 나란한 방향으로 입사되는 경우의 시간에 따른 HEMP 결합 신호이다. 침투치는 약 189 mA로 차폐층이 없는 경우에 비해 약 21배 감소된 결과이고, 이는 유전체층 외면에 68.78%의 차폐율을 갖는 차폐층을 감싸면서 직접적으로 내부 심선에 결합되는 신호가 감소했기 때문이며, 펄스폭에는 영향을 미치지 않는다.

3-2-2 동축 케이블의 구조에 따른 유기 전류

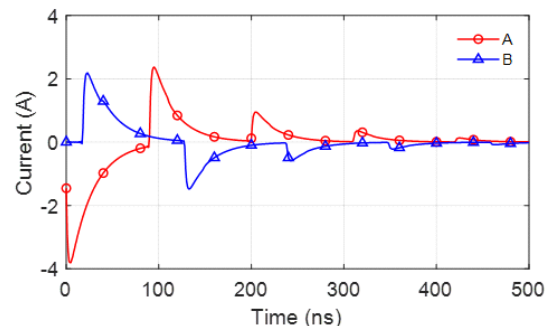
동축 케이블의 종류에 따른 결합 신호의 변화를 확인하기 위해 구조적 특징에 따라 유기 전류의 차이를 비교하였다. 3-2-1절에서 분석한 RG58 케이블을 기준으로, 심선의 개수 및 굵기, 차폐층의 설계 변수를 제외한 다른 조건은 동일하다. 그림 7(a)는 내부 심선의 구조이며, 내부 심선 개수, 심선 반지름에 따라 인입반에 유기되는 전류를 각각 그림 7(b), (c)에 나타냈다.

심선이 1개, 2개, 3개인 경우, 모두 심선 사이의 간격을 동일하게 유지하였기 때문에, 심선이 여러 개인 경우, 각



(a) 동축 케이블의 단면 및 시뮬레이션 환경

(a) Cross-section and simulation condition for a coaxial cable



(b) Case 1에 대한 유기 전류 해석 결과

(b) Coupling currents for the case 1

그림 6. 동축 케이블의 해석 조건 및 결과

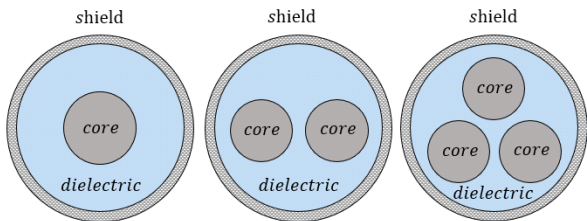
Fig. 6. Analysis setup and results of a coaxial cable.

표 1. RG58 케이블 및 차폐층의 제원

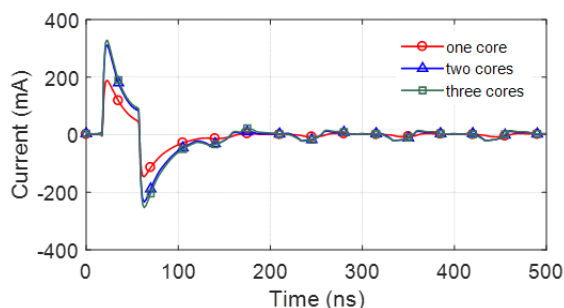
Table 1. RG58 cable and shield layer specification.

Inner core	Radius	0.45 mm
Dielectric layer	Thickness	1.025 mm
	Material characteristic	Polyethylene $\epsilon_r = 2.25, \tan \delta = 0.0004$
Shield layer	Thickness	0.325 mm
	No. of carriers	m=8
	No. of filaments	n=5
	Weave angle	45°

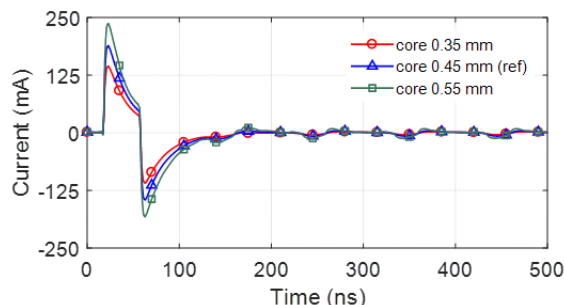
심선의 전류를 확인했을 때, 모두 동일한 결과를 얻었고, 본 논문에는 하나의 심선에 대한 결과를 나타내었다. 케이블의 심선 개수가 1개에서 2개, 3개로 늘어남에 따라



(a) 심선 개수에 따른 케이블 단면
(a) Cross-section of the cable in terms of the number of core



(b) 심선 개수에 따른 유기 전류 해석 결과
(b) Coupling currents in terms of the number of core



(c) 심선 반지름에 따른 유기 전류 해석 결과
(c) Coupling currents in terms of the radius of core

그림 7. 동축 케이블의 내부 심선 조건 및 결과
Fig. 7. Inner core line setup and results of a coaxial cable.

최대 유기 전류(첨두치)는 약 189.4 mA, 약 311.8 mA, 328.8 mA로, 심선의 개수가 한 개인 경우보다는 여러 개 일 때 더 큰 전류가 유기된다. 이는 심선의 개수가 많아짐에 따라 도선 간에 형성되는 커패시턴스 성분에 의해 심선 간의 결합이 발생하기 때문이다. 단, 시뮬레이션 상 차폐층의 stretching range의 한계로 인해 공간이 제한되어 있어 심선 개수가 늘어남에 따른 변화폭은 크지 않다.

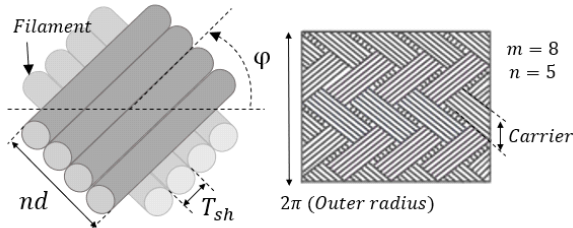
심선의 굵기에 의해서는 반지름이 0.35 mm인 경우, 최

대 유기 전류는 약 145 mA, 반지름이 0.45 mm인 경우 (즉, RG58과 동일한 경우), 첨두치는 약 189.4 mA, 반지름이 0.55 mm인 경우는 약 237.7 mA이다. 심선의 반지름이 0.1 mm 증가함에 따라 유기 전류는 대략 45 mA가 증가하고, 심선의 굵기가 두꺼울수록 전계가 도체에 닿는 면적이 증가하여 큰 전류가 유기된다. 이는 심선의 굵기가 얇은 케이블을 선택해 유기 전류를 줄일 수 있음을 의미한다.

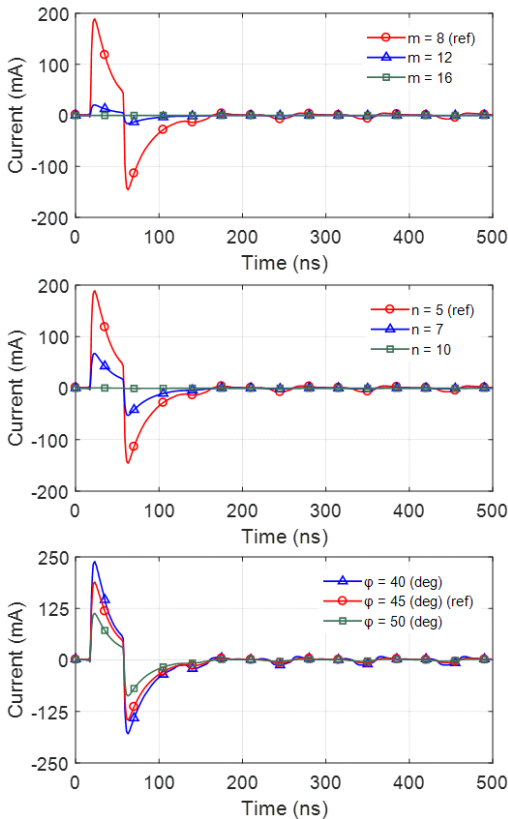
동축 케이블의 차폐층은 외부 전자파에 의한 결합을 감쇄시키고, 케이블의 유연성을 확보하기 위해 그림 8(a)와 같이 여러 도체선(필라멘트, filament)이 편조되어 있는 형태로 만들어진다. 여러 개의 필라멘트들이 모여 하나의 묶음인 캐리어(carrier)가 되고, 편조선의 기울기를 편조 각도라고 한다. 이러한 차폐층의 설계 변수인 필라멘트 수(m), 캐리어 수(n), 편조 각도(φ)는 차폐율에 주요한 영향을 미친다. RG58의 편조 조건인 $m=8$, $n=5$, $\varphi=45^\circ$ 로부터 캐리어의 개수가 4개 증가함에 따라 유기 전류가 약 20.7 mA로 9배 감소하였고, 16개인 경우 유기 전류 첨두치가 수 μ A로 급격히 감소하였다. 필라멘트의 경우에는 7개로 증가함에 따라 유기 전류 첨두치가 약 67.8 mA로 3배 감소했고, 10개로 증가하면 첨두치가 수 μ A로 감소한다. 캐리어와 필라멘트의 개수가 많아질수록 차폐층의 편조 밀도가 증가하기 때문에 차폐율이 높아진다. 특히, 캐리어 수(m)와 필라멘트 수(n)가 각각 16, 10개 이상이면 차폐율이 98.6%가 되어 완전히 차폐된다. 편조 각도(φ)에 대해서도 증가함에 따라 캐리어 사이에 존재하는 개구면의 크기가 작아지고, 감는 횟수가 많아져 편조 밀도가 증가한다. 따라서 40° 일 때 약 239.2 mA, 45° 일 때 약 189.4 mA, 50° 일 때 약 113.6 mA로 10° 증가함에 따라 유기 전류 첨두치가 2배 감소하는 것을 알 수 있다.

3-2-3 동축 케이블의 운용 조건에 따른 유기 전류

본 절에서는 케이블의 길이, 접지면으로부터의 높이 및 접지 조건 등 케이블을 운용할 때의 조건에 따라 유기 전류의 차이를 비교하였다. 그림 9(a)는 케이블의 길이 변화에 따른 인입반에 유기되는 전류 결과로, 유기 전류의 첨두치는 약 189 mA로 동일한 반면에, 펄스폭에는 변화



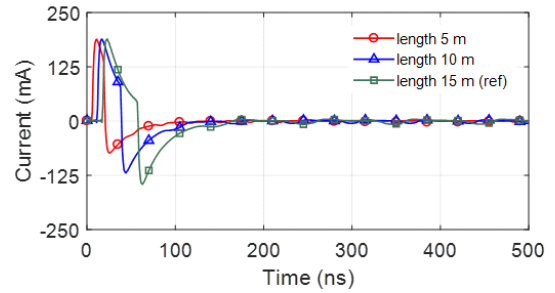
(a) 차폐층의 모식도 및 설계 파라미터
(a) Concepts and design parameters of the shield layer



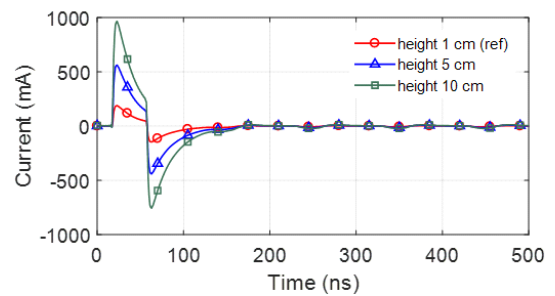
(b) 차폐층 조건에 따른 유기 전류 해석 결과
(b) Coupling currents in terms of the shield condition

그림 8. 동축 케이블의 차폐층 조건 및 결과
Fig. 8. Shield setup and results of a coaxial cable.

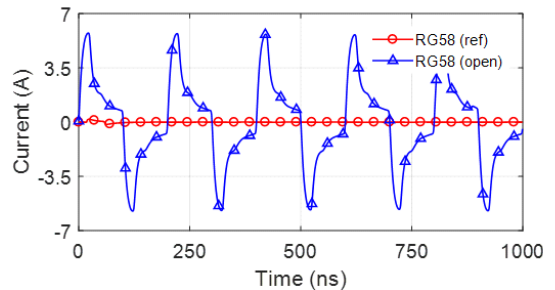
가 발생한다. 케이블의 길이가 5 m인 경우, 펄스폭은 약 108 ns, 10 m인 경우, 펄스폭은 약 135 ns, 15 m인 경우 펄스폭은 약 152 ns로 케이블의 길이가 5 m 증가함에 따라 유기 전류의 펄스폭은 27 ns 증가하고, 이는 결합 신호가 이동하는 경로 차이에 의한 것임을 알 수 있다. 그림 9(b)는 접지면으로부터의 높이에 따른 유기 전류이다. 케



(a) 케이블 길이에 따른 유기 전류 해석 결과
(a) Coupling currents in terms of cable length



(b) 접지면으로부터의 높이에 따른 유기 전류 해석 결과
(b) Coupling currents in terms of the height from the ground plane



(c) 케이블 입력단 차폐층의 접지 여부에 따른 해석 결과
(c) Coupling currents whether the point of the shield at the input port is grounded or not

그림 9. 운용 조건에 따른 유기 전류 해석 결과
Fig. 9. Coupling currents in terms of the operation conditions.

이블의 높이가 5 cm, 10 cm로 높아질수록 최대 유기 전류는 각각 약 563.5 mA, 966.2 mA로 급격히 커지는 것을 확인할 수 있다. 이는 케이블의 높이에 따라 발생하는 전위차가 커져 유기 전류가 달라지는 것이고, 케이블을 낮은 곳에 위치시키는 것이 결합 신호를 줄이는 방안임을 의미한다.

그림 9(c)는 케이블의 입력단 차폐층의 접지 여부에 따

라 인입반에 유기되는 전류 결과이다. 케이블 입력단 차폐층의 접지 여부에 의한 경향을 확인하기 위해 3-2-2절에서 분석한 RG58 케이블의 다른 조건은 유지한 상태에서 A지점 차폐층의 접지를 개방하였다. 유기 전류 침두치는 약 5.75 A로 차폐층을 접지했을 때에 비해 큰 차이가 있다. 차폐층의 접지를 개방하게 되면 전류의 귀환 경로의 크기, 즉 귀환 루프의 크기가 커지게 되어 자기장 간섭이 커지기 때문에 유기 전류가 커지게 된다. 따라서 케이블을 운용할 때 차폐층의 접지 여부가 결합 신호에 중

요한 요인이 될 수 있다.

3-3 HEMP-케이블 결합 신호 분석

표 2는 3-2절에서 계산한 결합 신호의 침두치와 펄스폭을 케이블 파라미터에 대해 나타낸 것이다. 차폐층이 없는 단일 도선의 경우, 2-2절에 의해 동축 케이블에 비해 직접 유기되는 전류가 많아 침두치가 매우 크다. 그러므로 HEMP 결합의 영향을 줄이기 위해서 차폐층이 있는 케이블을 사용할 필요가 있다.

표 2. 케이블 파라미터에 따른 침두치와 펄스폭 변화

Table 2. Peak value and pulse width in terms of various parameters of the cable.

Category	Parameters		Peak value(A)	Pulse width(ns)	Compare with the coaxial cable(RG58)
Single wire	Shield layer presence		2.188	220	The peak value is different about 11 times, the pulse width is long.
Coaxial cable(RG58)	Shield layer absence		0.189	152	‘-’ means same result with coaxial cable(RG58)
Cable structure	No. of cores	1	-	-	The more the number of cores is, the bigger the peak value is and no change in pulse width.
		2	0.312	-	
		3	0.329	-	
	Radius of core	0.35 mm	0.145	-	The thicker the core radius is, the bigger the peak value is and no change in the pulse width.
		0.45 mm	-	-	
		0.55 mm	0.238	-	
	Shield layer condition	No. of carriers	8	-	The more the number of carriers is, the smaller rapidly the peak value is and no change in the pulse width.
			12	0.021	
			16	≈ 0	
		No. of filaments	5	-	The more the number of filaments is, the smaller rapidly the peak value is and no change in the pulse width.
			7	0.068	
			10	≈ 0	
		Weave angle	40 deg	0.239	The bigger the weave angle is, the smaller the peak value is and no change in the pulse width.
			45 deg	-	
			50 deg	0.114	
Cable operating condition	Cable length	5 m	-	108	The longer the cable is, the longer the pulse width and no change in the peak value.
		10 m	-	135	
		15 m	-	-	
	Cable height	1 cm	-	-	The higher the height from the ground plane is, the bigger the peak value is and no change in the pulse width.
		5 cm	0.564	-	
		10 cm	0.966	-	
	Ground condition	short	-	-	As the ground of shield layer is open, the peak value is increase greatly.
		open	5.75	> 152	

전력선, 신호선 등 사용 목적에 따라 케이블의 구조적 조건이 달라지므로 심선 개수, 심선 굵기, 차폐층 조건에 따라 유기 전류를 비교하였다. 심선 개수에 대해서는 개수가 많아짐에 따라 도선 간에 형성되는 커패시턴스 성분에 의해 심선 간의 결합이 발생하여 침투치가 약 1.7 배 증가하는 것을 확인할 수 있다. 심선의 굵기에 대해서는 두꺼워질수록 도체의 면적이 커져 유기 전류의 침투치가 증가하므로 케이블의 구조적 특징을 고려해 사용해야 한다. 차폐층에 대해서는 캐리어, 필라멘트의 개수와 편조 각도에 따른 경향을 관측하였고, 개수가 늘어나고 편조 각도가 커짐에 따라 편조 밀도가 높아져 차폐율이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

케이블 자체의 구조뿐만 아니라, 운용하는 조건에 따라서도 유기 전류를 비교하였다. 케이블의 길이가 길어질수록 침투치의 변화는 거의 없으나, 전류의 이동 경로가 길어져 펄스폭이 커지므로 방호 장치가 유기 전류에 노출되는 시간에 대해서는 케이블 길이에 대한 고려가 필수적이다. 접지면으로부터의 케이블 높이가 높아지면 케이블과 접지면 간의 전위차가 커지게 되어 침투치가 급격히 증가한다. 또한, 케이블의 인입반 쪽이 아닌 케이블 입력단 쪽 차폐층을 접지하지 않으면 길이 공진에 의한 과전류가 발생해 인입반에 치명적인 피해를 입힐 수 있다.

해석 결과를 토대로, HEMP 방호용 셀터에 사용하는 케이블의 선택 및 사용에 대한 가이드라인을 마련할 수 있고 특히, 결합 신호를 크게 변화시킬 수 있는 운용 조건을 조절해 유기 전류 침투치 및 펄스폭을 통제하고, 구조적인 특징을 고려한 케이블 선택을 통해 HEMP 결합 신호를 방호할 것을 권고한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 HEMP 방호용 셀터에 연결된 케이블에 유기되는 결합 신호를 다양한 케이블 변수에 따라 해석하였다. 케이블의 특성 및 종류에 따라 유기되는 HEMP 결합 펄스 신호의 양상이 달라지므로 다양한 케이블의 구조 및 운용 방식에 따른 유기 전류를 분석하였다. 차폐층의 유무, 내부 심선 개수와 굵기, 차폐층의 편조 조건, 케이블 길이, 접지면으로부터의 높이, 입력단 접지 여부

에 따른 유기 전류를 해석했고, 해석 결과를 토대로 HEMP 방호 셀터 운용 시 유기 전류의 침투치와 펄스폭을 고려하여 연결 케이블을 선택 및 설계할 수 있다. 향후에는 세부적인 셀터 모델과 케이블이 결합된 상황을 해석적으로 구현하여 보다 정확한 케이블 결합 신호를 계산할 것이다.

References

- [1] R. Hoad, W. A. Radasky, "Progress in high-altitude electromagnetic pulse(HEMP) standardization," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 3, pp. 532-538, Jun, 2013.
- [2] *Department of Defense Interface Standard: High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 1 - Fixed facilities, MIL-STD-188-125-1*, 1998.
- [3] *Department of Defense Interface Standard: High-Altitude Electromagnetic Pulse(HEMP) Protection for Ground-Based C4I Facilities Performing Critical, Time Urgent Missions, Part 1 - Transportable Systems, MIL-STD-188-125-2*, 1999.
- [4] J. H. Kwon, K. H. Song, and J. G. Yook, "HEMP effect analysis for equipment using comparison of norms between HEMP filter residual current and conducted susceptibility criteria," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 2, pp. 199-207, Feb. 2014.
- [5] J. H. Jin, "HEMP filter development trend and design method," *The Magazine of the IEIE*, vol. 41, no. 7, pp. 45-58, 2014.
- [6] P. Hu, X. D. Mu, Z. X. Yi, and S. C. Wang, "Effect of wiring method on coupling of cables under HEMP irradiation," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 186, no. 5, p. 012037.
- [7] Z. Jianguo, Z. Xin, "Coupling effect of transmission lines by HEMP based on CST," in *2014 XXXIth URSI General*

- Assembly and Scientific Symposium(URSI GASS)*, Beijing, Aug. 2014.
- [8] T. H. Jang, "Analysis of PCI cable effects in HEMP conducted disturbance," *The Journal of Koreans Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 8, pp. 772-780, Aug. 2013.
- [9] J. Jin, D. Jang, and N. Kim, "Research for HEMP protection and performance verification of vehicle mobile shelter," *The Conference of the Korean Society of Automotive Engineers*, Nov. 2013, pp. 1377-1387.
- [10] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, 2nd ed. Hoboken, NJ, Wiley-Interscience, 2005.
- [11] M. D'Amore, M. Feliziani, "EMP coupling to coaxial shielded cables," in *IEEE 1988 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Seattle, WA, Aug. 1998, pp. 37-44.
- [12] 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.
- [13] J. H. Lee, J. H. Cho, and E. J. Kim, "Analysis of HEMP coupling signal for a coaxial cable with braided shields," *The Journal of Koreans Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 8, pp. 790-796, Aug. 2011.
- [14] W. J. R. Hoefer, "The transmission-line matrix method: Theory and applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 33, no. 10, pp. 882-893, Oct. 1985.
- [15] J. Cho, H. Kim, and K. Y. Jung, "Simple transmission line model suitable for the electromagnetic pulse coupling analysis of twisted-wire pairs above ground," *IEICE Electronics Express*, vol. 13, no. 7, p. 20160149, Apr. 2016.
- [16] M. Lanoz, "A comparison between HEMP and HPEM parameters. Effects and mitigation methods," in *2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, May 2008. pp. 275-278.
- [17] S. K. Pukkalla, B. Subbarao, "Study on modeling and simulation analysis of electromagnetic pulse(EMP) coupling to cables," in *2018 15th International Conference on ElectroMagnetic Interference & Compatibility (INCEMIC)*, Bengaluru, Nov. 2018, pp. 1-4.

조 성 희 [연세대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6518-1744>



2020년 2월: 서경대학교 전자공학과 (공학사)
2020년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
[주 관심분야] EMI/EMC, HEMP

노 영 훈 [연세대학교/석·박사 통합과정]

<https://orcid.org/0000-0003-3479-2838>



2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2017년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
[주 관심분야] 전자기 수치해석, 마이크로파 구조 해석 및 설계, HEMP

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

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 파동공학 연구소 선임연구원
2009년 10월~2011년 10월: 한국전자통신

연구원 선임연구원

2011년 11월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 무선통신 신호처리, EMP

박 용 우 [국방과학연구소/기술원]

<https://orcid.org/0000-0001-5726-8268>



2016년 3월 : 충남대학교 산업공학과(공학석사)
2012년 10월~현재 : 국방과학연구소 기술원
[주 관심분야] EMI/EMC, HEMP

육 중 관 [연세대학교/교수]

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



1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)
[주 관심분야] 수치해석, 바이오 센서, 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박막 공정 구조, EMI/EMC, HEMP, 플라즈마 해석

이 동 혁 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6362-748X>



2011년 2월: 전북대학교 전기공학과 (공학석사)
2011년 9월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] EMI/EMC, HEMP