다층 지하 구조물로의 고고도 전자기파(HEMP) 커플링 현상에 대한 전자기적 모델링

Electromagnetic Modeling of High Altitude Electromagnetic Pulse Coupling into Large-Scale Underground Multilayer Structures

강희도 · 오일영 · 김정호* · 육종관

Hee-do Kang · Il-Young Oh · Jung Ho Kim* · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 다층 지하 구조물로의 고고도 전자기파(high altitude electromagnetic pulse: HEMP)의 커플링 현상을 분석하였다. 이를 위하여, 고고도 전자기파에 대한 모델링을 통하여, 고고도 전자기파의 스펙트럼이 100 MHz 이상의 대역에서 -30 dB 이하로 급격히 감소함을 확인하였다. 또한, 고고도 전자기파의 커플링 영역인 다층 지하 구조물은 지구의 표면과 내부를 구성하는 5층 구조물로 가정하여, 본 구조물을 구성하는 물질의 전파상수(propagation constant)를 바탕으로 투과 현상을 분석하였다. 그 결과, 50 kV/m의 평면파를 입사시켰을 때, 지상에서 100 m 깊이에 위치한 지하 터널에서 0.1 MHz와 1 MHz의 평면파에 대하여 각각 약 10 kV/m와 5 kV/m의 투과 현상이 발생함을 확인하였다. 투과된 전기장의 효과적인 차폐 효과 확보를 위하여 토양층의 감쇠 상수(attenuation constant)를 이용한 자연 차폐 방법과 금속 격자 구조물의 필터링(filtering) 현상을 이용한 차폐 방법을 통하여 각각 최대 20 dB와 90 dB의 차폐 효과를 얻을 수 있음을 분석하였다.

Abstract

This paper gives a electromagnetic coupling mechanism of the high altitude electromagnetic pulse (HEMP) into large-scale underground multilayer structures using analytic and numerical methods. The modeling methods are firstly addressed to the HEMP source which can be generated by intentional nuclear explosion. The instantaneous and intense electromagnetic pulse of the HEMP source is concerned from DC to 100 MHz band, because the power spectrum of the HEMP is rapidly decreased under -30 dB over the 100 MHz band. Through this range, a penetrated electric field distribution is computed within the large-scale underground multilayer structures. As a result, the penetrated electric field intensities at 0.1 and 1 MHz are about 10 and 5 kV/m, respectively. Therefore, additional shielding techniques are introduced to protect buried structures within the large-scale underground structures such as high-lossy material and filtering structures (wire screen).

Key words : High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP), Large-Scale Underground Multilayer Structure, Electromagnetic Modeling, Penetration, Shielding

I. 서 론

1960년대 이후로 고고도 전자기파(high altitude electromagnetic pulse: HEMP)는 군사 방어 분야뿐 아

「이 연구는 2010년도 LIG 넥스원의 연구비 지원으로 수행되었음.」

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

*LIG 넥스원 전자전 연구센터(Electronic Warfare R&D Lab., LIG NEX1)

· Manuscript received November 25, 2011 ; Revised January 19, 2012 ; Accepted February 13, 2012. (ID No. 20111125-05S)

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

나라, 시민의 안전 및 기반 시설에 대한 큰 위협으로 대두되어 왔다. 이러한 고고도 전자기파는 지상으로 부터 수십 킬로미터 상층 지점에서 핵 폭발이 일어났을 때 발생하는 전자기파로써, 핵 폭발 시 방출되는 감마선(gamma-ray)이 지상의 공기 분자와 충돌을 일으켜 공기 분자의 자유 전자를 방출시키는 콤프톤 효과(Compton effect)를 발생시킨다. 이러한 콤프톤 효과에 의하여 방출된 자유 전자는 지상으로 빛의 속도(speed of light)에 가까운 상대론적 속도(relativistic speed)로 진행하게 되며, 지구를 구성하고 있는 지자기장(geomagnetic field)을 통하여 매우 큰 진폭을 갖고, 수 나노 초(nano-seconds)의 상승 시간을 갖는 전자기파를 발생시킨다^[1]. 이러한 순간적이고 강한 전자기파가 지상에 도달하였을 경우, 지상의 기반 시설을 구성하는 많은 전자기기들로 커플링되어 손실 및 파괴 현상을 야기시킬 수 있다.

고고도 전자기파에 의한 기반 시설의 파괴 현상 분석을 위하여 1962년 두 가지 중요한 실험이 수행되었다. 본 실험들은 “Starfish test”와 “Soviet Union exo-atmospheric test”라는 이름으로 각각 수행되었으며, 그 결과 지상 전력 공급 장치 및 전력선의 절연 파괴(dielectric breakdown), 화재 경보기 손실 및 각종 안전 장치에서의 화재 등의 현상을 발생시켰다^[2]. 이후, 이러한 두 가지 대표적인 실험을 바탕으로 고고도 전자기파에 의한 지상 구조물 혹은 전력선으로의 커플링 현상에 대한 많은 연구들이 진행되어왔다^{[3]~[7]}. 고고도 전자기파의 분석을 위하여, 참고문헌 [3]에서는 $10^4 \sim 10^7$ Hz 대역에서 번개(lightning)에 의한 전자기장과 고고도 전자기파 간의 비교, 분석을 하였다. 그리고 참고문헌 [4]~[7]에서는 고고도 전자기파가 지상의 전력선 및 통신선으로 커플링되는 현상에 대하여 분석하였다. 하지만, 이러한 많은 연구들은 지상에 위치한 전력선 등으로의 커플링 현상과 지상 구조물의 개구(aperture), 접합부(junction), 그리고 슬롯(slot) 등으로의 커플링 현상 등에 국한되었으며, 고고도 전자기파에 의한 물질에서의 투과 및 반사 특성에 대한 연구는 소개되지 않았다.

일반적으로 주파수 성분을 갖는 전자기장은 유한한 유전율을 갖는 물질에 대하여 투과 및 반사, 손실, 그리고 왜곡 등의 현상을 발생시킨다. 고고도에서의 핵 폭발에 의한 고고도 전자기파 역시 DC에서

수백 MHz 대역까지 높은 파워 스펙트럼을 갖기 때문에, 이와 동일한 현상이 발생할 수 있다^{[8],[9]}. 따라서 본 논문에서는 고고도 전자기파의 다층 지하 구조물로의 커플링 및 투과 현상에 대하여 분석하고자 하며, 이러한 분석은 물질에서의 전파 상수(complex propagation constant)를 통한 분석 방법(analytic solution)과 시간 영역 유한 차분법(finite difference time domain, FDTD)을 바탕으로 수행되었다. 이러한 방법을 통하여 지하 구조물의 각 지점에서 전기장의 크기를 계산하였으며, 투과된 전기장의 차폐 효과 확보를 위하여 지하 구조물의 유전율을 통한 자연 차폐 방법과 금속 격자 물질을 이용한 필터링 방법에 대한 분석을 하였다.

II. 고고도 전자기파 및 다층 지하 구조물 모델링

지상으로부터 수십 킬로미터 상층부에서의 핵 폭발에 의하여 발생한 고고도 전자기파는 발생 시간 및 방법에 따라 세 가지 펄스(E_1 , E_2 , E_3)로 분류할 수 있다. 이러한 세 가지 펄스 중, E_1 펄스가 가장 큰 진폭과 짧은 상승 시간을 갖고 있으며, 1996년 IEC standard 61000-2-9에서 아래와 같이 모델링 되었다^[1].

$$E_1(t) = 65000(e^{-at} - e^{-bt}), \quad (1)$$

이 때, 상수인 a 와 b 는 각각 $a=4 \times 10^7$ [1/s]이고, $b=6 \times 10^8$ [1/s]이다. 식 (1)과 같이 모델링 된 E_1 펄스를 시간 축과 주파수 축에서 나타내면 그림 1과 같다.

그림 1에서 확인할 수 있는 것과 같이 E_1 펄스는 50 kV/m의 진폭을 가지며, 수 나노 초의 상승 시간을 갖는다. 이렇게 짧은 상승 시간을 갖는 펄스는 주파수 축에서 광대역 파워 스펙트럼을 갖게 되는데, E_1 펄스의 경우, 100 MHz 대역에서 약 30 dB의 손실을 갖음을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 DC 영역에서 100 MHz 대역에 대한 전자기 커플링 현상을 분석하고자 한다.

일반적으로 큰 파워를 갖는 고주파 성분(high power radio-frequency components)은 전자기기의 절연 파괴 및 손상을 야기시킬 수 있는 국부적 가열(localized heating) 현상을 발생시킨다. 그리고 주파수를 갖는 성분들은 금속 물질이 아닌 유한한 유전율을

그림 1. 시간 축과 주파수 축에서의 E_1 펄스Fig. 1. E_1 pulse in the time and frequency domain.

갖는 물질 속에서 전파 혹은 투과 현상이 발생한다. 따라서 DC 영역에서 수백 MHz 대역의 고주파 스펙트럼을 갖는 E_1 펄스 역시 유한한 유전율을 갖는 물질에서 전파 특성을 나타내며, 투과된 주파수 성분들에 의하여 특정한 전자기기 등에 절연 파괴 및 손상을 야기시킬 수 있다.

E_1 펄스의 전파 및 투과 현상을 분석하기 위하여 그림 2와 같은 다층 지하 구조물을 가정하였다. 가정한 지하 구조물의 물질은 일반적으로 지구를 구성하는 물질에 입각하였으며, 구성하고 있는 분포에 따라 5층의 구조를 가정하였다.

다층 지하 구조물의 첫 번째 층은 공기층으로써, 고고도 전자기파가 발생한 지상의 공기층을 의미한다. 그리고 두 번째와 세 번째 층은 토양층과 암석층을 가정하였다. 이는 지구의 표면부에 분포하는 토양층과 지구의 맨틀 부분 직전까지 분포하는 암석층을 의미한다. 네 번째 층인 공기층은 암석층 내부에 존재할 수 있는 임의의 지하 터널을 가정한 것이고, 마지막 다섯 번째 층은 지구 맨틀 부분까지 분포하는 암석층을 의미한다. 이 때, 첫 번째 층과 다섯 번째 층은 각각 $-z$ 와 $+z$ 방향으로 무한한 크기를 갖음을 가정하였는데, 이는 고고도 전자기파가 발생하는 첫 번째 층은 지구의 상층부로 무한하게 존재함을 가정한 것이고, 마지막 층은 지구의 크기를 가정

그림 2. 다층 지하 거대 구조물

Fig. 2. Large-scale underground multilayer structure.

하여 무한한 암석층으로 고려했기 때문이다.

다층 지하 구조물로의 고고도 전자기파의 커플링 현상 분석을 위하여, 그림 1과 식 (1)에서 모델링한 E_1 펄스를 그림 2와 같은 구조물에서 발생시켜 각 층에서의 전기장 분포를 확인하였다. 이를 위하여 지하 구조물을 구성하는 각 층의 측정된 유전율에 기반 한 전파 상수를 이용한 분석 방법과 Yee's scheme을 이용한 1차원 시간 영역 유한 차분법을 사용하였다^[12].

전파 상수를 이용한 분석 방법을 위하여, E_1 펄스가 지하 구조물로 수직하게 입사함을 가정하였다. 이는 고고도 전자기파가 일반적으로 지상 30 km 이상의 지점에서 발생하기 때문에 지구의 형상이 무한한 평면인 1차원 문제로 해석될 수 있기 때문이며, 이렇게 발생한 E_1 펄스가 지상으로 가장 가까운 거리로 커플링 됨을 가정하기 위함이다.

첫 번째 공기층에서 입사된 E_1 펄스가 지표면인 토양층으로 수직 입사하게 되면, 공기층과 토양층의 경계면인 $z=0$ 인 지점에서 투과와 반사 특성이 발생하게 된다. 이는 공기층과 토양층의 고유 임피던스 (intrinsic impedance)가 서로 다르기 때문이며, 이에 따라 공기층에는 $+z$ 방향으로 진행하는 파와 경계

면에서 반사되어 $-z$ 방향으로 진행하는 파가 공존하게 된다. 또한, 토양층으로 투과된 파는 다시 토양층과 암석층 사이의 경계면인 $z = d_1$ 지점에서 투과와 반사 현상을 발생시킨다. 이러한 임피던스의 부정합(mismatch)에 의하여, 구조물의 각 층에서는 입사파와 반사파가 서로 공존하게 된다. 하지만, 마지막 다섯 번째 암석층에서는 파가 진행하는 $+z$ 방향으로 임피던스의 부정합을 발생시키는 경계면이 존재하지 않기 때문에 다른 모든 층과는 달리 오직 입사파만 존재하게 된다. 이러한 구조물에서의 투과와 반사 특성을 고려하여 식 (2)와 같이 각 층에서의 전기장 분포를 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_1 &= E_1^+ e^{-\gamma_1 z} + E_1^- e^{+\gamma_1 z}, \\ E_2 &= E_2^+ e^{-\gamma_2 z} + E_2^- e^{+\gamma_2 z}, \\ E_3 &= E_3^+ e^{-\gamma_3 z} + E_3^- e^{+\gamma_3 z}, \\ E_4 &= E_4^+ e^{-\gamma_4 z} + E_4^- e^{+\gamma_4 z}, \\ E_5 &= E_5^+ e^{-\gamma_5 z}, \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 E_1, E_2, E_3, E_4, E_5 는 각각 구조물 내부 물질 (그림 2에서의 air1, soil, rock1, air2, rock2)에서의 전기장을 의미하며, 각각의 층 내부에서의 입사파($E_1^+, E_2^+, E_3^+, E_4^+, E_5^+$)와 층간 경계면에서 발생하는 반사파($E_1^-, E_2^-, E_3^-, E_4^-$)의 조합으로 표현된다. 또한, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5$ 는 구조물의 각 층에서의 전파 상수를 의미하고, 그림 2에서 가정한 물질에 의하여, 첫 번째 층과 네 번째 층의 전파 상수는 서로 같고 ($\gamma_1 = \gamma_4$), 세 번째 층과 다섯 번째 층의 전파 상수 역시 서로 동일하다($\gamma_3 = \gamma_5$).

$$\begin{aligned} E_1^- &= E_1^+ (AX - BY) / (AY - BX), \\ E_2^+ &= (AE_1^+ + BE_1^-) / 2, \\ E_2^- &= (BE_1^+ + AE_1^-) / 2, \\ E_3^+ &= (CE_2^+ e^{-\gamma_2 d_1} + DE_2^- e^{+\gamma_2 d_1}) e^{+\gamma_3 d_1} / 2, \\ E_3^- &= (DE_2^+ e^{-\gamma_2 d_1} + CE_2^- e^{+\gamma_2 d_1}) e^{-\gamma_3 d_1} / 2, \\ E_4^+ &= (PE_3^+ e^{-\gamma_3 d_2} + QE_3^- e^{+\gamma_3 d_2}) e^{+\gamma_4 d_2} / 2, \\ E_4^- &= (QE_3^+ e^{-\gamma_3 d_2} + PE_3^- e^{+\gamma_3 d_2}) e^{-\gamma_4 d_2} / 2, \\ E_5^+ &= (E_4^+ e^{-\gamma_4 d_3} + E_4^- e^{+\gamma_4 d_3}) e^{+\gamma_5 d_3}. \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)에서와 같이 각 층에서의 전기장 관계식을

통하여, 입사된 고고도 전자기파인 E_1^+ 를 제외한 나머지 변수들($E_1^-, E_2^+, E_2^-, E_3^+, E_3^-, E_4^+, E_4^-, E_5^+$)을 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 그리고 각각의 변수에서 사용된 계수들($A, B, C, D, P, Q, R, S, U, V, X, Y$)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= 1 + \eta_2 / \eta_1, \\ B &= 1 - \eta_2 / \eta_1, \\ C &= 1 + \eta_3 / \eta_2, \\ D &= 1 - \eta_3 / \eta_2, \\ P &= 1 + \eta_4 / \eta_3, \\ Q &= 1 - \eta_4 / \eta_3, \\ R &= \eta_5 / \eta_4 - 1, \\ S &= \eta_5 / \eta_4 + 1, \\ U &= RPe^{-\gamma_3 d_2 - \gamma_4 (d_3 - d_2)} - SQe^{-\gamma_3 d_2 + \gamma_4 (d_3 - d_2)}, \\ V &= SPe^{+\gamma_3 d_2 + \gamma_4 (d_3 - d_2)} - RQe^{+\gamma_3 d_2 - \gamma_4 (d_3 - d_2)}, \\ X &= UCe^{-\gamma_2 d_1 + \gamma_3 d_1} - VDe^{-\gamma_2 d_1 - \gamma_3 d_1}, \\ Y &= VCe^{+\gamma_2 d_1 - \gamma_3 d_1} - UDe^{+\gamma_2 d_1 + \gamma_3 d_1}. \end{aligned} \quad (4)$$

이 때, η 는 각 층에서의 고유 임피던스를 의미하며, 그림 2에서 가정한 물질에 따라 첫 번째 층과 네 번째 층에서의 고유 임피던스와, 세 번째 층과 다섯 번째 층에서의 고유 임피던스는 서로 동일하다 ($\eta_1 = \eta_4, \eta_3 = \eta_5$).

고고도 전자기파에 의한 다층 지하 구조물로의 커플링 현상을 분석하기 위하여, 식 (2), (3)과 같이 물질의 전파 상수를 이용하여 구조물의 각 지점에서 전기장의 크기를 계산하였다. 위의 식에 적용될 전파 상수는 각 층에서의 비유전율(relative permittivity)과 손실 탄젠트(loss-tangent)를 이용하여, 식 (5)와 같이 계산할 수 있다^[13].

$$\gamma = j\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right)^{1/2}. \quad (5)$$

각 층에서의 전파 상수를 얻기 위하여 토양층과 암석층에서의 복소 유전율(complex permittivity)를 적용하였다^{[14],[15]}. 적용된 복소 유전율은 실제 토양과 암석층에 대한 측정을 통하여 얻어진 결과이며, 이를 구조물에 입사시킨 평면파의 주파수에 따라 비유전율과 손실 탄젠트로 계산한 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1. 각 층에서의 비유전율과 손실 탄젠트

Table 1. Relative permittivity and loss-tangent of the each media.

구성 물질	주파수(MHz)	비유전율	손실 탄젠트
토양	0.1	41.0	43.9
	1	16.0	11.9
	10	10.0	1.9
	100	10.0	0.2
암석	0.1	2.8	0.6
	1	2.8	0.4
	10	2.8	0.3
	100	2.8	0.2

그림 3. 다층 지하 거대 구조물에서의 E_1 펄스 분포
Fig. 3. E_1 distribution in the large-scale underground multilayer structure.

표 1에서 확인할 수 있듯이, 토양의 유전 상수는 주파수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내지만, 암석의 경우 주파수에 관계없이 특정한 값을 유지한다. 또한, 토양의 손실 탄젠트가 암석보다 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이를 통하여 다층 지하 구조물로 고고도 전자기파가 입사할 경우, 두 번째 층인 토양층에서 큰 손실을 겪게 됨을 예측할 수 있다.

그림 3과 4는 다층 지하 구조물의 모든 지점에서 전기장의 분포를 나타낸다. 다층 지하 구조물로 입사된 평면파는 0.1, 1, 10, 100 MHz이며, 이는 앞서 언급한 것과 같이 고고도 전자기파가 DC에서 100 MHz 대역까지 넓은 파워 스펙트럼을 갖기 때문이다. 그림 3에서 확인할 수 있듯이, 모든 평면파는 토

그림 4. 다층 지하 거대 구조물에서의 E_1 펄스 분포
Fig. 4. E_1 distribution in the large-scale underground multilayer structure with normalized log-scale.

양층과 암석층에서 손실이 발생하며, 층간 경계면에서 다중 반사(multiple reflection)가 발생함을 확인할 수 있다. 특히 주파수가 높은 10 MHz와 100 MHz의 평면파의 경우, 다른 주파수(0.1, 1 MHz)의 평면파보다 짧은 파장을 갖기 때문에, 층간 경계면에서의 임피던스 부정합에 따른 다중 반사에 의한 정재파(standing wave)를 보다 쉽게 확인할 수 있다. 그리고 10 MHz와 100 MHz의 평면파는 토양층과 암석층에서 다른 주파수의 평면파보다 큰 손실이 발생함에 따라 암석층의 깊이가 깊어질수록 더 많은 손실을 겪게 되고, 지하 100 m인 지점에 위치하는 공기층에서 매우 작은 전기장이 분포함을 확인할 수 있다. 실제 E_1 펄스는 10 MHz 이상의 대역에서 그 이하 대역의 스펙트럼보다 작은 스펙트럼을 갖지만, 본 연구에서는 각각의 대역에서의 손실을 확인하기 위하여 모든 주파수에서 동일한 스펙트럼을 가정하였다.

이와 반대로, 상대적으로 낮은 주파수인 0.1 MHz와 1 MHz의 평면파의 경우, 지하 공기층에서 각각 약 10 kV/m과 5 kV/m의 전기장이 분포함을 확인할 수 있다. 이는 낮은 주파수의 평면파들은 암석층에서 보다 낮은 손실을 겪기 때문이며, 이는 주파수가 증가함에 따라 물질의 감쇠 상수가 제곱근에 비례하여 증가하기 때문이다.

다층 지하 구조물에서의 주파수에 따른 평면파의 분포를 로그 분포를 통하여 그림 4와 같이 확인할 수 있다. 앞서 언급한 것과 같이, 0.1 MHz와 1 MHz

의 평면파는 지하 구조물의 깊이가 증가함에 따라 상대적으로 작은 손실이 발생하여 지하 100 m 지점의 지하 공기층으로 큰 전기장이 투과함을 확인할 수 있으며, 10 MHz와 100 MHz의 평면파는 주파수에 따라 증가하는 감쇠 상수에 의하여 암석층의 깊이에 따라 매우 큰 손실이 발생함을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 전파 상수를 통한 분석 방법이 시간영역 유한 차분법으로 분석한 결과와 매우 큰 상관관계를 갖고 있음을 확인할 수 있으며, 이를 바탕으로 본 분석 방법에 대한 실효성을 검증하였다.

결론적으로, 물리적으로 큰 지하 구조물의 경우라도 지상에서 발생한 고고도 전자기파의 많은 양이 지하 깊은 지점까지 투과됨을 확인할 수 있었다. 이렇게 투과된 전자기파는 지하 공기층에 존재하는 전자기기에 대한 유전 파괴 및 손상 현상을 발생시킬 수 있기 때문에, 물리적으로 큰 지하 구조물일지라도 차폐 효과를 얻기 위한 구조물의 적용이 불가피하다.

III. 투과된 고고도 전자기파로부터의 방호 방안

제 II절에서 고고도 전자기파가 다층 지하 거대 구조물로 침투되는 현상을 분석하였으며, 그 결과 0.1 MHz와 1 MHz의 평면파의 경우 약 10 kV/m와 5 kV/m의 전기장이 분포함을 확인하였다. 이에 따라 물리적으로 큰 지하 구조물일 경우라도 지하 공기층에서의 차폐 현상을 얻기 위하여 추가적인 방호 방안 적용이 불가피하다. 따라서 본 절에서는 지하 공기층에서의 차폐 효과 증가를 위하여, 물질의 손실 탄젠트에 따른 자연 차폐 방안과 금속 격자 구조물에 의한 차폐 방안에 대하여 분석하고자 한다.

3-1 물질의 손실 탄젠트를 이용한 자연 차폐

표 1에서 살펴본 바와 같이, 다층 지하 구조물을 구성하는 물질 중, 토양층이 암석층보다 큰 손실 특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 따라서 추가적인 차폐 구조물을 적용하지 않은 채, 지하 공기층으로 투과되는 전기장의 크기를 줄이기 위하여 토양층의 두께를 조절하면 자연 차폐 효과를 얻을 수 있음을 유추할 수 있다.

그림 5. 토양층의 두께에 따른 E_1 펄스 분포

Fig. 5. E_1 distribution in the large-scale underground multilayer structure as the variation of the soil thickness.

그림 5는 토양층의 두께에 따른 다층 지하 구조물에서의 전기장의 분포를 나타낸다. 지하 공기층이 분포하고 있는 전체 깊이는 100 m로 고정된 채, 토양층의 두께를 2 m에서 10 m로 증가시켰을 때 지하 공기층으로 투과되는 전기장의 세기는 0.1 MHz와 1 MHz의 평면파에 대하여 약 2 kV/m와 1 kV/m로, 기존의 2 m의 토양층일 때보다 약 5배의 차폐 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

일반적으로 토양과 암석은 수분의 함유량에 따라 감쇠 상수 값이 변한다^{[14],[15]}. 특히, 수분의 함유량이 증가함에 따라 점점 큰 손실을 얻을 수 있으며, 이러한 수분 함유량의 변화에 따라 자연 차폐 효과를 증가시킬 수 있다.

그림 6은 수분 함유량이 5 %인 토양층과 18 %인 토양층의 두께에 따른 지하 100 m 깊이의 지하 공기층에서의 전기장을 나타낸다. 이러한 수분 함유량에 따른 전기장의 크기는 식 (2)~(4)에서의 복소 유전율 값을 수분 함유량에 따른 유전율을 적용함과 동시에, 토양층의 두께가 1~10 m까지 증가함에 따른 지하 100 m에서의 투과된 전기장의 크기를 계산한 것이다. 수분 함유량이 높은 18 %의 토양층은 5 %의 토양층과 비교하여 복소 유전율의 허수부분의 값이 약 5배 크기 때문에, 18 %의 감쇠 상수가 더욱 커지게 된다. 이에 따라 토양층에서 발생하는 손실이 커지게 되며, 결과적으로 지하 공기층으로 투과되는 E_1 의 크기가 그림 6과 같이 줄어들게 된다. 따라서

그림 6. 토양층의 수분 함유량과 두께에 따른 지하 공기층에서의 E_1 펄스

Fig. 6. E_1 distribution in the large-scale underground multilayer structure as the variations of the soil thickness and water content.

추가적인 차폐 구조물을 적용하지 않은 상태에서, 자연 차폐 효과를 높이기 위해서는 손실이 큰 물질의 두께를 증가시키거나, 수분 함유량을 증가시킴으로써, 고고도 전자기파의 침투율을 줄일 수 있다.

3-2 금속 격자 구조물에 의한 차폐

앞서 3-1절에서는 물질의 감쇠 상수를 이용한 자연 차폐 효과에 대하여 분석하였다. 이러한 자연 차폐 효과는 지하 공기층으로 투과되는 전자기장의 차폐를 위한 가장 기본적인 방법이며, 쉘터(shelter)와 금속 격자 구조물(wire screen) 등을 통한 의도적인 차폐 구조물에 의한 차폐 효과에 비하여 비교적 차폐 효과는 떨어진다.

최근 건물 등과 같은 콘크리트 구조물에서의 전자기파 차폐를 위하여 철근 콘크리트 구조물에 대한 차폐 효과 분석이 이루어졌다^{[10],[11]}. 하지만 본 연구에서 가정한 구조물은 다층 지하 구조물이기 때문에, 콘크리트와 같은 구조물의 적용 대신, 임피던스 전이 지점에서의 금속 격자 구조물의 적용에 의한 차폐를 고려하고자 한다.

그림 7(a)와 같이 주기적으로 금속 격자 구조가 배열되어 있는 구조물은 금속 간격에서 발생하는 슬롯에 의하여 주파수에 따른 필터링 효과를 가지며, 이러한 필터링 효과는 식 (6)과 같이 간단한 수식을 통하여 예측할 수 있다^{[16],[17]}.

(a) 금속 격자 구조물

(a) Wire screen

(b) 지하 구조물에서의 금속 격자 구조물 배치

(b) Disposition of the wire screen in the underground structure

그림 7. 금속 격자 구조물에 의한 차폐 방안

Fig. 7. Shielding method using the wire screen.

$$SE_{dB} \approx 20 \log \left(\frac{\lambda_g/2}{g} \right), \quad (6)$$

이 때, λ_g 와 g 는 각각 파장과 금속 격자 사이의 간격을 의미하며, 위의 식은 평면파 혹은 원거리장(far-field)일 경우에 적용 가능하고, $g < \lambda_g/2$ 의 경우에 적용될 수 있다. 만일 $g \geq \lambda_g/2$ 인 경우에는 금속 격자 구조물로 전자기장이 투과되기 때문에 차폐 효과를 기대하기 어렵다. 이러한 수식은 금속 격자 구조물에서 금속 간 간격 대비 파장이 큰 평면파들을 반사 손실로 발생시켜 필터링 효과를 얻을 수 있음에 기반하고 있다.

위의 식 (6)을 이용하여 금속 격자 사이의 간격에

그림 8. 금속 격자 구조의 간격에 따른 차폐 효과
Fig. 8. Shielding effectiveness of the wire screen as a variation of the gap.

따른 차폐 효과를 그림 8과 같이 예측할 수 있다. 따라서 이러한 금속 격자 구조물을 그림 7(b)와 같이 지하 공기층 상단부에 적용하거나, 각 층의 경계면에 적용한다면, 지하 공기층으로 투과되는 고고도 전자기파의 크기를 줄일 수 있다. 금속 격자 구조물을 적용하였을 경우, 지하 공기층으로 투과되는 고고도 전자기파를 표 2와 같이 계산할 수 있다.

표 2에서 확인할 수 있듯이, 금속 격자 구조물은 0.1 MHz와 1 MHz 대역에서 금속 간격에 따라 약 78 dB 이상의 차폐 효과를 가지며, 이에 따라 지하 공기층으로 투과되는 E_1 펄스를 효과적으로 차폐시킬 수 있다. 앞서 언급한, 지하 공기층으로 투과된 0.1

표 2. 금속 격자 구조물 적용에 따른 지하 공기층으로 투과되는 E_1 펄스의 양

Table 2. Penetrated E_1 into the air2 layer by shielding effect of the wire screen.

주파수 (MHz)	투과된 E_1 (A_{dB})	금속 간격(m)	차폐 효과 (SE_{dB})	필터링된 E_1 ($A_{dB} - SE_{dB}$)
0.1	-15.01	0.05	89.54	-104.55
		0.10	83.52	-98.53
		0.15	80.00	-95.00
		0.20	77.50	-92.50
1.0	-20.14	0.05	89.54	-109.68
		0.10	83.52	-103.66
		0.15	80.00	-100.14
		0.20	77.50	-97.64

MHz와 1 MHz의 E_1 펄스는 각각 약 10 kV/m와 5 kV/m이며, 이를 로그 단위로 환산하면 각각 -15.01 dB와 -20.14 dB이다. 이렇게 투과된 E_1 펄스는 금속 격자 구조물(금속 간격이 0.05 m인 경우)에 의하여 최대 -109.68 dB까지 줄일 수 있어, 지하 공기층에서의 차폐 효과를 기대할 수 있다. 하지만 이는 금속 격자 구조물을 도파관 이론에 기반하여 얻어진 간단한 차폐 분석 방법으로써, 금속 격자 구조물이 서로 전기적으로 완전하게 연결되어 있어야 가능하다. 또한, 차폐 효과를 위한 금속 구조물들은 반드시 다수의 접지를 통하여 공고한 접지를 이루어져야 위와 같은 차폐 효과를 얻을 수 있다. 따라서, 금속 구조물을 이용한 차폐 방법에는 이와 같이 많은 부분에 대한 고려가 반드시 수반되어야 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다층 지하 구조물로의 고고도 전자기파의 커플링 현상에 대하여 분석하였다. 특히, 물리적으로 큰 구조를 갖는 지하 공기층으로의 투과된 고고도 전자기파의 양을 정량적으로 분석하였으며, 이를 전파 상수를 이용한 분석 방법과 수치 해석 기법의 상관관계를 통하여 그 실효성을 검증하였다. 또한, 지하 공기층으로 투과된 고고도 전자기파의 차폐를 위하여 물질의 손실 탄젠트를 이용한 자연 차폐 방법과 금속 격자 구조물 적용에 따른 차폐 방법을 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] "Description of HEMP environment-radiated disturbance", *IEC Standard 61000-2-9*, 1996.
- [2] J. S. Foster, E. Gjeld, R. J. Hermann, H. M. Kluepfel, G. K. Soper, L. L. Wood, J. B. Woodard, and W. Graham, "Report of the commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse attack", *Congressional EMP Commission*, vol. I: Executive Report, Apr. 2004.
- [3] M. A. Uman, M. J. Master, and E. P. Krider, "A comparison of lightning electromagnetic fields with the nuclear electromagnetic pulse in the frequency

- range $10^4 \sim 10^7$ Hz", *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, vol. EMC- 24, no. 4, pp. 410-416, Nov. 1982.
- [4] F. M. Tesche, P. R. Barnes, "A multiconductor model for determining the response of power transmission and distribution lines to a high altitude electromagnetic pulse(HEMP)", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4, no. 3, pp. 1955-1964, Jul. 1989.
- [5] E. Lombardini, G. Cariani, "EMC/NEMP technology from military applications to telecommunications", *International Telecom. Energy Conference*, Oct. 1989.
- [6] M. Ianoz, B. I. C. Nicoara, and W. Radasky, "Modeling of an EMP conducted environment", *IEEE Trans. on Electromagn. Compat.*, vol. 38, no. 3, pp. 400-413, Aug. 1996.
- [7] K. Sunitha, M. J. Thomas, "Transient NEMP field coupling with buried shielded cables", *International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, Nov. 2008.
- [8] H. D. Kang, I. Y. Oh, and J. G. Yook, "Electromagnetic modeling of high altitude electromagnetic pulse coupling into large-scale multilayer structure", *2011 Korea-Japan Microwave Conference*, Nov. 2011.
- [9] 강희도, 오일영, 육종관, "다층 거대 구조물로의 고 에너지 전자기 펄스 커플링 현상 분석", 2011년 종합학술발표회, 21(1), p. 34, 2011년 11월.
- [10] 현세영, 이경원, 육종관, "전자기파에 대한 철근 콘크리트의 차폐 효과 모델링", 한국전자과학회 추계마이크로파 및 전파학술대회, 34(2), pp. 76, 2011년 9월.
- [11] 현세영, 이경원, 김민석, 육종관, "철근 콘크리트에 의한 전자기파 차폐 효과 모델링", 한국전자과학회 논문지, 23(3), pp. 384-391, 2012년 3월.
- [12] A. Taflov, S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method, 3rd Edition*, Artech House, MA, 2005.
- [13] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics, 2nd Edition*, Addison Wesley, MA, 1989.
- [14] Y. S. Touloukian, W. R. Judd, and R. F. Roy, *Physical Properties of Rocks and Minerals*, McGraw-Hill, NY, 1981.
- [15] M. Oh, Y. Kim, and J. Park, "Factors affecting the complex permittivity spectrum of soil at a low frequency range of 1 kHz~10 MHz", *Environment Geology*, vol. 51, pp. 821-833, Jul. 2006.
- [16] H. W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, NY, 1989.
- [17] K. W. Lee, Y. C. Cheong, I. P. Hong, and J. G. Yook, "Design equation of shielding effectiveness of honeycomb", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Jul. 2005.

강 희 도

2008년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
 2008년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
 [주 관심분야] High-Speed Digital Circuit Design, Modeling, Packaging, EMI/EMC, 안테나 시스템, HEMP

오 일 영

2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학부(공학사)
 2007년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
 [주 관심분야] Numerical Analysis, Finite-difference Time-domain, Small and High Gain Antenna, HEMP

김 정 호

2002년 8월: 포항공과대학교 물리학
학과 (이학사)

2006년 2월: 포항공과대학교 물리학
학과 (이학석사)

2010년 2월: 포항공과대학교 물리학
학과 (이학박사)

2009년 9월~2010년 12월: (주) SP

Microwave 선임연구원

2010년 12월~현재: LIG 넥스원 선임연구원

[주 관심분야] Microwave, Beam Physics, HEMP, RKA

육 중 관

1987년 2월: 연세대학교 전자공학과
(공학사)

1989년 2월: 연세대학교 전자공학과
(공학석사)

1996년 12월: University of Michigan
전기전자공학과 (공학박사)

1997년 1월~1998년 9월: University

of Michigan Research Fellow

1998년 10월~1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer

1999년 3월~2000년 2월: 광주과학기술원 조교수

2000년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

2012년~2013년: IEEE Distinguished Lecturer (EMC Society)

[주 관심분야] 마이크로파 시스템 해석 및 설계, 안테나
시스템, RF MEMS, Bio-radar and Sensors, Computational
Electromagnetics, EMI/EMC, HEMP