Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 23, No. 3 pp. 358-364, 2022

https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.3.358
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

전력선 전자기파 라인소스의 매설 영향성에 관한 고찰

이상무
한국전자통신연구원 표준연구본부

Scrutinization on the Effectivity of the Soil to Electromagnetic Wave by a Buried Line Source with Power Level Frequency

Sangmu Lee
Standards & Open Source Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약 매설된 전력선 또는 도체 전자기파의 주변 영향성은 대기 중에 있을 때와 비교하여 감쇠될 것으로 예상한다. ITU 규격 상으로도 그렇고 주요 국 연구자료로써도 두 가지 매질에 대한 계산식이 다르다. 하지만 실제 시설 환경 조건에서 정말 그런지 의문점에 대하여 막상 제대로 제시된 바가 없다. 이에 본 논문은 두 가지 매질 상태의 실질적 차이를 이론 수식과 더불어 실험실증으로 비교·규명하였다. 토양 매질이 없는 경우 칼슨식으로, 매질이 있는 경우 폴라첵식으로 계산한다. 현실적으로 결정적인 변수는 매설 깊이이다. 상수관 또는 지중 전력선 등 도체는 깊어서 2m 정도에 매설된다. 동일한 배치 조건에 대해서 계산·비교하였을 때 감쇠를 기대하는 매설 영향성은 유효하지 않다. 이에 대하여 직접 수조모델을 구축하여 비교 실험을 하였는데, 매질이 있고 없음에 따른 차이가 없는 것으로 실증되었다. 이와 같은 결과는 실제에서 도체가 매설되었다고 하더라도 토양의 영향성은 사실상 없다고 볼 수 있으므로 마치 토양 매질이 없는 것과 같이 대기 중의 계산방법을 취하여도 무방하다는 것을 말한다.

Abstract The effectivity of electromagnetic waves from buried sources in power level frequency is expected to be lesser than their effectivity in air. The formulae for these two cases are different, as shown in the leading countries' research materials and the contents of ITU standards. However, there have been no well-defined reports on whether the reduction in effectivity phenomenon is observed in practical conditions. So, this paper compares the two situations by calculation and experiment and investigates effectivity. Carson equation is used for free space, and Pollaczek equation is used for the environment of the ground boundary. The practically critical determinate in this study is the buried depth. Generally, conductor lines like a water pipe or power line are buried at depths of around 2 m at most. The conductivity of soil appeared ineffective from the calculations and comparison for such a depth range. Experiments also verified this through comparative conditions in a constructed power circuit model comprising a liquid conductive frame. These results mean we can regard the buried conductor as in the air of distance equal to the depth of burial while evaluating the induction problem by a power line.

Keywords : Line Source, Buried Conductor, Power Frequency, Induction, Electromagnetic Wave

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신·방송 표준개발지원사업의 일환으로 하였음[2017-0-00075, 방송통신 설비 기술기준 연구].
*Corresponding Author : Sangmu Lee(ETRI)
email: sangmu@etri.re.kr
Received December 16, 2021 Revised January 21, 2022
Accepted March 4, 2022 Published March 31, 2022

1. 서론

전력선 주파수에 의한 전자기파는 주변 시설과 통신서비스, 나아가 인체에도 영향을 미칠 수 있다. 전형적으로 이 전력선에 의한 전자기파는 주변 통신선에 전자유도에 의한 기전력(패러데이법칙에 의하여 선로에 전압이 걸리는 것을 말한다)을 야기시키고 또한, 유도전류가 흐르므로 통신서비스에 장해를 발생시키거나 인체에 위해를 가할 수 있다. 즉 전력선 주변에 어떠한 형태로든 존재하는 선로 도체에는 유도전류가 흐를 수 있다. 그러므로 이에 의한 위해 영향 방지를 위하여 법으로 대책을 마련하도록 하고 있다[1].

유도를 발생시키는 동일한 전류원(라인소스 또는 원천전류; line source)에 의한 어떤 선로도체의 유도전류는 또 다른 선로도체의 마찬가지 유도전류에 대하여 역기전력(작용 방향이 반대임)으로 작용하므로 유도전류를 서로 감쇠시켜주는데, 이를 차폐효과라고 한다. 그래서 유도대책을 위한 유도전압을 산출할 때에 면밀한 계산을 위하여 이러한 선로들 간의 전자기적 영향 관계를 해석하는 일이 중요하다. 아울러 방사 원천들이 어떤 매질의 상태에 있느냐 하는 것이 선로들 간 유도 커플링을 이루는 전자기파의 전파 특성을 결정하므로 해석의 배경으로 다루어야 한다. 전력선 시설 환경에서 주된 전파 매질은 이동통신서비스를 위한 전자기파의 전파에서도 마찬가지이지만 대기와 대지로 양분되어 있다. 대지라는 무한 반평면이 있는 상태의 전파 해석은 기초적으로 필요하다.

본 논문에서 다루고자 하는 것은 특별히 매설된 도체 선로에 대하여 전력선 주파수 레벨의 전자기파가 방사되거나 또는 입사할 때, 대지를 형성하고 있는 매질인 토양에 의하여 어떤 정량적 변화 영향이 있는지를 실질적으로 알아보고자 하는 것이다. 이것은 근본적으로 매설된 도체에 의한 대기 중 선로의 전자기파 유도를 평가하기 위하여 먼저 규명하여야하는 관건이다. 대지와 대기 매질 관계에서 유도를 발생시키는 선로 간 커플링의 기초 정량 파라미터인 상호인덕턴스를 계산하는 식은 개발 제시되어 있다[2]. 또한, 매설된 도체의 전자계 계산에 필요한 전파상수를 산출하는 계산식도 제시되어 있다[3]. 일본에서는 1980년대 중반 당시 매설 도체관에 의한 차폐계수 계산방법론을 개발하기도 하였으나 이론과 실측간의 괴리로 인하여 완성하지 못하였다[4]. 그런데 이러한 노력들은 매설 도체에 의한 차폐 또는 대기에서의 전자기파 강도를 바로 해석/계산할 수 있도록은 하지만, 실제로 매설된 것으로 인한 효과가 어느 정도인지에 대해서 제시하는 것은 아니다. 이 말은 선로의 동일한 배치 관계에서 토양 매질이 있고 없음에 의한 차이가 실제로 어떻게 작용된 것이냐를 의미한다. 즉, 토양도 도전율을 가지고 있기 때문에 전자파 해석에 있어서 일종의 차폐 영향을 갖는데, 대지 내의 전파 해석을 위하여는 복잡한 수식을 사용하여야 하므로 현실적 적용을 위하여 전력선 전자기파의 주파수 범위와 실제 시설 조건 파라미터에서의 현상이 어떠한지를 앎으로써 유도대책을 위한 평가에 효율성을 가져올 수 있다. 이를 위하여는 토양 매질 유무에 따른 비교분석을 수행하여야 한다.

따라서 본 논문에서는 대지를 경계로 한 유도 영향 관계에서 대표적 수식을 통한 유도 파라미터의 비교 계산 결과를 제시한다. 그리고 대지를 소규모로 모사한 매질 유무에 따른 실증적 실험 결과를 포함하였다. 이러한 과정 및 분석 결과로부터 매설 도체 선로에 의한 전자기파 영향에 대하여 현실적으로 어떻게 적용하면 되는지를 제시한다.

2. 매설 영향에 관한 계산상 비교 분석

2.1 전력선 유도전압 계산식

2.1.1 기본 계산식

전력선에 의하여 인근 선로에 발생하는 유도전압을 계산하는 기초식은 Eq. (1)과 같다[5,6]. 본 논문에서 다루는 계산 문제에 대한 해석은 유도 간섭 관계를 나타내는 핵심 요소인 상호인덕턴스(M)를 비교함으로써 가능하다.

$$V = j\omega M \ell I K \quad [\mathrm{V}] \tag{1}$$

V: Induced voltage by a power line[V]
ω: Angle frequency[rad/s]
M: Mutual inductance between power line and induced line[H/km]
ℓ: Parelllized length of coupled lines[km]
I: Inducing current[A]
K: Shielding coefficient

2.1.2 상호인덕턴스(M)계산식

대지를 반평면으로 한 상태에서 대기 중에 있는 두 개의 도체 간 상호인덕턴스를 계산하는 식은 칼슨(Carson)에 의하여 개발되었다[7]. 그 식은 Fig. 1과 같은 배치 구성에서 Eq. (2)와 같다.

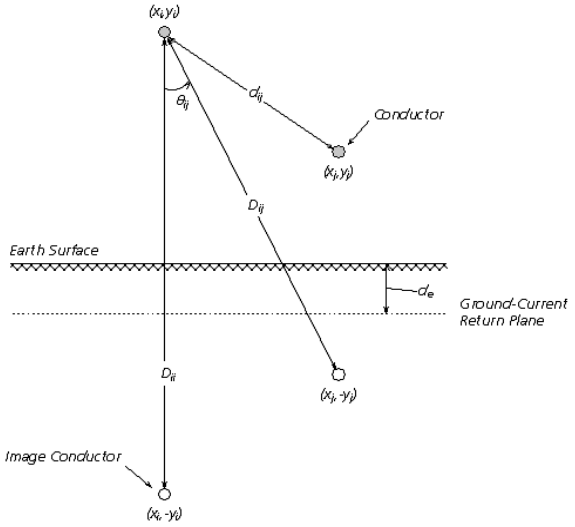

Fig. 1. Geometrical position relationship of two lines in the air

$$M_{ij}=\frac{\mu_0}{2\pi}\left\{\ln\frac{D_{ij}}{d_{ij}}+2\int_0^{\infty}\frac{e^{-\alpha\cos\theta_{ij}}\cos(\alpha\sin\theta_{ij})}{\alpha+\sqrt{\alpha^2+j\gamma_{ij}^2}}d\alpha\right\}$$
$$=\frac{\mu_0}{2\pi}\left(Z_{M_{ij}}+Z_{G_{ij}}\right) \quad (2)$$

$$D_{ij}=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i+y_j)^2}$$
$$d_{ij}=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i-y_j)^2}$$
$$\theta_{ij}=\tan^{-1}\frac{x_i-x_j}{y_i+y_j},\ \gamma_{ij}=\frac{D_{ij}}{|d_e|},\ d_e=\sqrt{\frac{\rho}{j\omega\mu}}$$

ρ: earth resistivity[Ω·m]

ω: angle frequency using 60Hz for the commercial power[rad/s]

$\mu = \mu_0$: free space permeability[H/m]

두 개의 선로도체가 대지를 경계로 하는 경우, 배치 모델은 Fig. 2와 같다. 이 경우에는 폴라첵(Pollaczek)이 개발한 Eq. (3)이 있다[8]. 이상의 식들은 모두 적분항을 가지고 있는 원론적인 것으로서 실제로 계산을 하려면 급수처리에 의한 컴퓨터프로그램을 만들어 사용해야한다. 이 적분항 계산에 대해서는 학계에서 다수의 계산 유형 시도들이 있어왔으나 일반적인 현장에서 계산 실용성이 없기 때문에 결과적으로 국제표준화기구인 ITU(국제전기통신연합, International Telecommunication Union)에서 1989년에 관계 지침을 개발하여 공표하였다[9]. 이를 근간으로 위 두 가지 배치 상태에 대하여 다음과 Eq. (4)와 (5)의 간략화된 실용식을 사용한다[10-12].

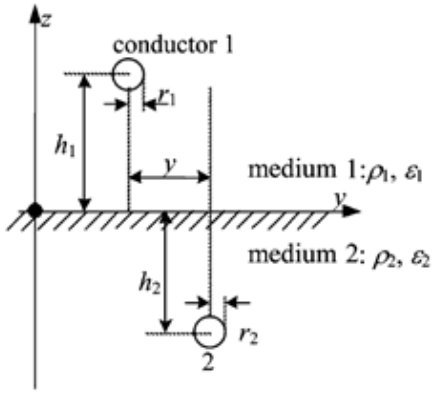

Fig. 2. Geometrical position relationship of two lines with the earth as a boundary

$$M_{12}=\frac{\mu_0}{2\pi}\left\{K_0(m_1d)-K_0(m_1D)+\int_{-\infty}^{\infty}F_1(s)e^{jys}ds\right\}$$
$$F_1(s)=\frac{e^{-\left(|h_1|\sqrt{s^2+m_1^2}+|h_1|\sqrt{s^2+m_2^2}\right)}}{\sqrt{s^2+m_1^2}-\sqrt{s^2+m_2^2}} \quad (3)$$
$$m_i^2=j\omega\mu_0\sigma_i\ (i=1,2),$$
$$\sigma=1/\rho(earth\,conductivity)$$

K_0 means the Bessel 3rd kind in mode 0

$$M_{ij}|_{allinair}=\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{D_{ij}'}{d_{ij}} \quad (4)$$

$$D_{ij}'=\sqrt{(x_i-x_j)^2+(y_i+y_j+2d_e)^2}$$
$$M_{ij}|_{earthcross}=\frac{\mu_0}{2\pi}\left\{\ln\frac{S}{D}-\frac{2}{3}\left(\frac{h_e}{S^2}\right)^3H(H^2-3y^2)\right\} \quad (5)$$
$$S=\sqrt{H^2+y^2},\ D=\sqrt{(h_1+h_2)^2+y^2}$$
$$h_e=1/m,\ H=h_1+h_2+2h_e$$

2.2 수식 적용 계산 비교분석

2.2.1 실제 계산 적용 좌표 배치와 파라미터

실제 시설 환경에서 평균적으로 유도 환경을 고려할 수 있는 전형적 값을 사용한 선로의 배치 관계를 Fig. 3과 같이 사용한다. y ≤ 0가 지중이다. 대지저항률(ρ)은 분포 편차가 크긴 하지만 계산 편의에 맞도록 전형적인 값을 사용했다. 계산 편의상 지중 도체의 x 좌표는 원점에 위치시켰다. 실제의 통신선로 시설에서 통상의 가공 전주의 높이는 10m 정도면 적정하다. 수평 이격거리(100m)는 유도 영향에서 어느 정도 근접된 범위로 볼 수 있다. 이격거리는 어차피 멀어질수록 M 값은 떨어지는

것이고, 여기서는 대지 매설에 의한 영향성이 실제 계산에서 어떻게 나타나는지가 관건이므로 매설 깊이 변수인 b를 가변하여 살펴보겠다. 우선의 지중 도체 기준 배치 위치는 b = 1로 잡고 있다. 이것은 통상의 지중 도체의 깊이이다. 매설된 상태를 고려한 것은 Eq. (5)에 의한 것이고, 영향 비교를 위하여 대지를 제거하고 동일 매질인 대기로 간주하여 계산하는 것은 Eq. (4)에 의한 것이다.

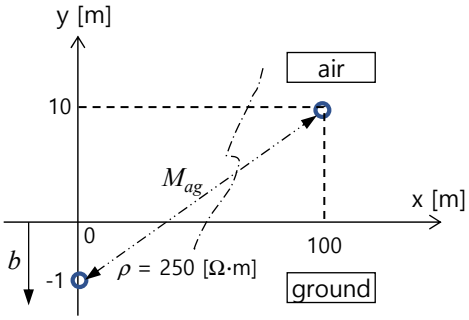

Fig. 3. Displacement of practical lines for sample calculation

2.2.2 지중 영향성에 관한 계산 상 결과 비교

각 식 상호인덕턴스와 더불어 깊이 변수에 따른 매설 영향성을 의미하는 감쇠율(δ = (Eq.(4)-Eq.(5))/Eq.(4) [%]), 그리고 Eq. (1)의 정규화(ℓ=1km, K=1, I=60A)시킨 유도전압까지 매트랩 프로그래밍하여 b = 5m까지 계산 시뮬레이션하면 Fig. 4와 같다.

폴라첵 식(Eq. (5))의 매설 영향성(∂)에 의하여 감쇠율이 깊이에 따라 증가하는 것은 맞지만 그 요율이 1 % 미만으로 미미하다. 통상 매설 기준 깊이라 할 수 있는 1 m에서 감쇠 정도가 0.1 %에 불과하다. 이를 최종적 유도전압으로 환산한 그래프에서 보면 유도전압의 차이는 1/100 수준에서 변화하고 있으므로 무시할 수 있다.

3. 실증적 실험 수행

앞의 이론 수식에 의한 비교분석에서 매설 도체에 대한 대지 투과 유효성의 현업 상 의문점인 대기중과 대지 내 선로의 유도 영향에 차이가 있는지 현상 여부를 실증 실현해보았다. 전자기파의 감쇠에 관하여는 도전율이 영향을 미치는 것이므로 이를 수조모델 실험으로 특성을 동질화시킬 수 있다. 실제 현장에서 대지가 있고 없음에 따른 현상 실험은 사실상 불가능하기 때문에 이렇게 구사하면 매질 유무에 따른 차이 확인이 가능하다. Fig. 5에 실험 구성과 실물을 나타냈다.

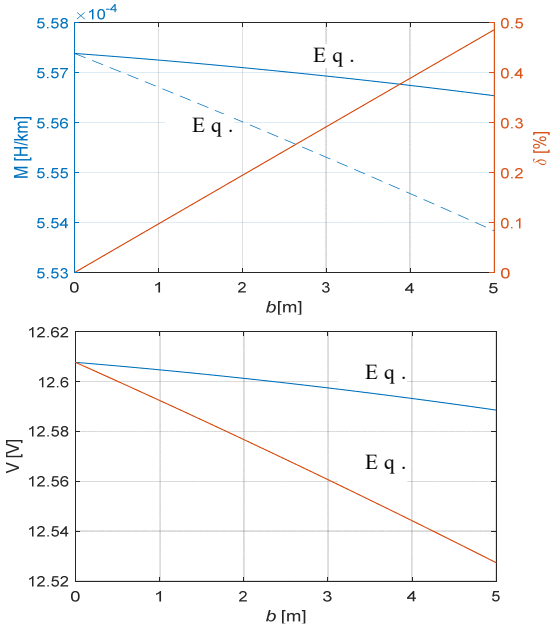

Fig. 4. Calculation Comparison Graph

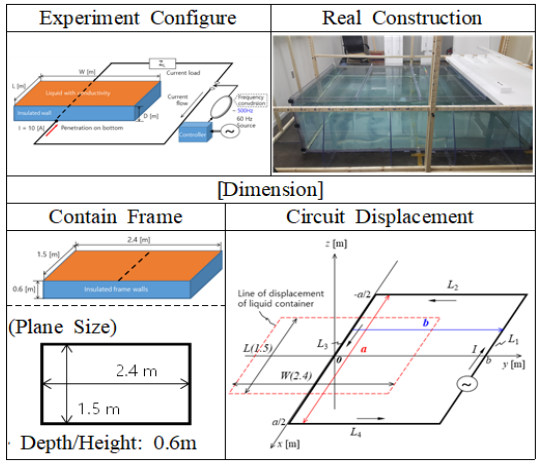

Fig. 5. Construction showing experiment

측정 실행의 요점은 전력선을 바닥에 두고 자유공간 상태에서 먼저 측정을 하고, 수조에 도전율을 갖도록 한 액체를 담아 측정하여 비교한다. 도체 전류는 10A를 흘려주고 자기장을 측정하였다. 교류전류 발생 주파수는 기본 60Hz와 500Hz에서 측정하였다. 액체의 도전율은 용해성 소디엄클로라이드(Sodium Chloride)를 이용하여 약 200mS/cm까지 하였다. 이것은 환산하면 20S/m

인데, 저항률로는 0.05Ω·m이고 대지에서 가질 수 있는 값으로서는 사실 초과된 범위이며 바닷물에 해당하는 도전율이다. 그렇더라도 이 범위에서 투과 유효성을 알면 그 이하 범위는 자동으로 포함되어 판단되므로 상관없다.

매질 틀을 밑으로 한 그 상부 측정 위치 평면은 Fig. 6과 같다. 자기장 실측 결과는 Fig. 7과 같다.

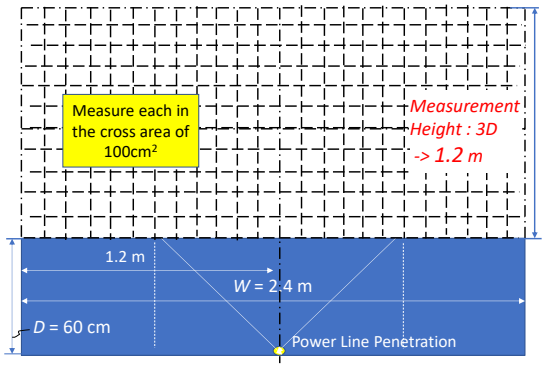

Fig. 6. Configuration of measurement positions

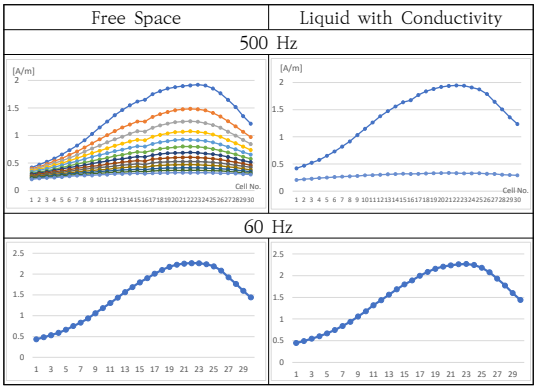

Fig. 7. Comparison whether or not medium exists

측정기는 전력선 주파수 전자기파 측정에 특화된 EHP-50을 사용하였다. 맨 위의 곡선이 수면에 가장 가까운 위치이므로 강도가 가장 세다. 최초 자유공간 상태에서는 중간 범위를 모두 측정하였으나 가장 아래 위치 강도의 패턴을 알면 그 보다 높은 위치의 강도는 단지 거리에 따른 비례적 변화 상태이므로 매질 비교 측정에서는 굳이 반복하지 않았다.

Fig. 7로부터 매질에 도전율이 있는 것과 자유공간에서의 데이터 변화에 각 측정 사용 주파수에 있어서 눈에 띄는 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것을 몇 개 주요 위치의 데이터값으로 비교해 보면 아래 Fig. 8과 같이 거의 차이가 없다.

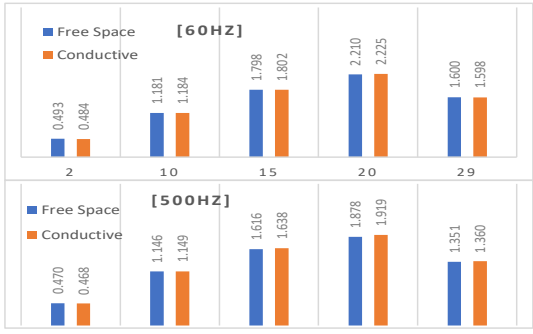

Fig. 8. Main value comparison

4. 표피깊이에 따른 현상 판단

도전율을 가지고 있는 매체에 대한 전자기파의 투과는 다음 Eq. (6)에 따른 소위 표피깊이(skin-depth)를 가지고 있다[14].

$$d_s = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{(2\pi f)\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}}\ [m] \quad (6)$$

이것의 의미는 전자기파가 도전성 매질에 투과하여 그 세기가 약 63% 경감될 때까지의 거리를 말하는데, 매질의 도전율(σ)과 전자기파의 주파수(f)에 반비례한다. 즉 도전율이 높거나 주파수가 높을수록 투과거리(도전성 매질에서 유효하게 진행할 수 있는 거리)가 짧아진다. 자성체가 아닌 이상, 매질의 투자율(μ)은 자유공간의 것과 같다.

실험에 사용된 두 가지 주파수(60 및 500 Hz)에 대하여 실험 도전율 주변 범위에서 Eq. (6)에 의한 투과거리를 시뮬레이션하면 Fig. 9와 같다. 이 그래프가 의미하는 것은 실험 도전율 20S/m의 경우 감쇠 유효 투과거리가 60Hz에서는 약 15m이고 500Hz는 약 5m이다. 즉, 실험 수조는 깊이 0.6m이므로 거의 감쇠없이 투과된다고 할 수 있다. 그리고 약 1m 투과거리가 되려면 Eq. (6)으로부터 도전율이 1000S/m를 넘어서야 한다.

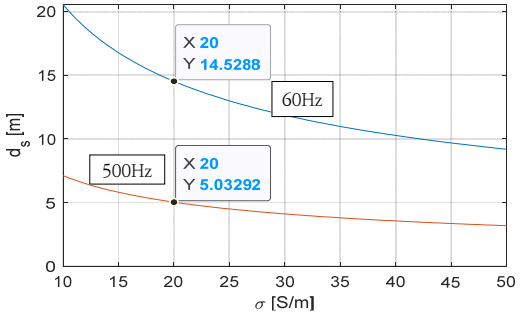

Fig. 9. Skin-depth to cunductivity

그 다음은 대지저항률 범위에서 표피깊이는 다음 Eq. (7)로 계산하여야 한다. 이 식으로 시뮬레이션하면 Fig. 10과 같다. 유전상수는 물과 유사한 100을 적용하였다. 대지에 작용하는 표피깊이는 훨씬 크다. 대지저항으로서는 아주 낮은 값이라 할 수 있는 10Ω·m에서 주파수 1kHz라 하더라도 50m가 된다.

$$d_s = \left[\omega\sqrt{\mu\epsilon}\sqrt{0.5\left\{\sqrt{1+(\rho\omega\epsilon)^{-2}}+1\right\}}\right]^{-1}\text{[m]} \quad (7)$$

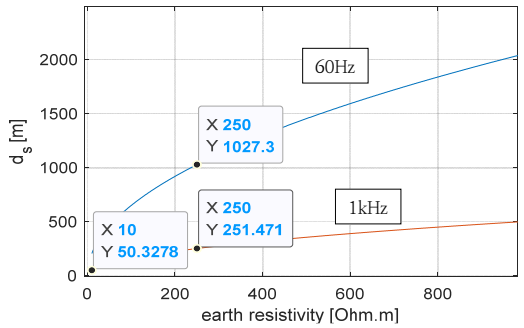

Fig. 10. Skin-depth to earth resistivity

5. 결론

전력선 전자기파 유도 환경에서 광역상수관 또는 가스관 등 매설관류나 도체 선로가 매설되어 유도를 발생시킬 때에 대지저항률(역으로는 대지도전율)이 있는 토양으로 인한 실질적인 영향성을 수식적 차원과 실증적 차원에서 비교분석하였다. 즉, 토양이라는 매질이 있고 없음에 따라 전자기파 영향이 실제로 얼마나 달라지는지를 규명하고자 한 것이다. 수식으로서는 토양 매질이 없는 경우, 칼슨식을 쓰고, 있는 경우 폴라첵식을 사용하면 된다. 실증실험에 있어서는 수조 모델을 이용하여 액체가 있고 없음에 따라 각기 전자기파를 실측함으로써 직접 비교된다. 대지의 영향성은 매설 깊이가 1차적 제한 범위이다. 위와 같은 도체관류 또는 전선 등의 매설 깊이는 대략 1m 내외 위치이고, 깊어도 2m 정도이다. 그것은 시설 비용과 유지보수의 문제가 있기 때문에 너무 깊이 매설할 수 없고 그럴 필요도 없다.

상용 전력 주파수인 60Hz에서 계산수식으로 비교할 때 1m 매설 깊이에 대하여 감쇠율은 0.1%에 불과하다. 수조 실험 모델의 500Hz에서도 깊이 0.6m 조건에서 액체 매질이 있고 없음에 따른 전자파 강도의 차이는 거의 없었다. 실제로 대지에서 유효한 감쇠를 기대할 수 있는 깊이는 표피깊이(skin-depth) 관점에서 1 kHz 주파수라 하더라도 50m이기 때문에 현실적 유효 범위 밖에 있다.

이러한 결과로부터 전력선 유도 현상을 다루는 문제에서 매설 도체류에 대한 토양 매질의 영향성은 마치 없는 것과 같이 간주해도 되며, 대기와 동일 매질의 계산방식을 취하여도 무방하다.

References

[1] Ministry of Science and ICT, "The rules on Technical Regulation of Broadcasting and Telecommuniication Facilities", *Presidential Orders No. 31380*, 2021.1.5.

[2] F. Pollaczek, "Uber das Feld einer unendlich langen wechselstrom durch- flossenen Einfachleitung," Electrishe Nachrichten Technik (ENT), Vol. .3, No. 9, pp. 339–359, Jul. 1926.

[3] J. Dabkowski, A. Taflove, Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Lines and Gas Transmission Pipelines, Vol. 1: Engineering Analysis, Final Report of EL-904/Research Project 742-1, Electric Power Research Institute, pp. 2-5~2-8, Sep. 1978.
DOI: https://doi.org/10.2172/6401992

[4] The Academy Society of Electronics and ICT in Japan, The summary and recent technology of countermeasures against electromagnetic induction, *Report of Special Committee for Inspection on Induction*, pp. 113-152, 1987. 9.

[5] Radio Research Agency, The technical regulation on the calculation method of induced voltages by power lines, *RRA Noitce No. 2014-11*, 2014. 7. 2.

[6] Stzka, Induction – the part I, Tokai branch of Telecommunications Association, pp. 105-108, 1978.

[7] J. R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return," Bell Syst. Tech. J., Vol. 5, pp. 539–554, 1926.

[8] Akihiro Ametani, et al., "An Investigation of Earth-Return Impedance Between Overhead and Underground Conductorsand Its Approximation", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 51, No. 3, pp. 860–867, Aug. 2009.
DOI: https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2019953

[9] ITU-T DIRECTIVES Volume III: Capacitive, Inductive and Conductive Coupling: Physical Theory and Calculation Methods, *DIRECTIVES concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines*, pp. 141–147, 1989.

[10] Kyung Choi, Hwang-Kyu Choi, Sangmu Lee, Hyang-Beom Lee, "A Study on the Improvement of Electrified Railway Inducing Voltage Calculation Algorithm", *The Transactions of the Korean Institute of Electrical*

Engineers, Vol. 69, No. 11, pp. 1785-1794, 2020. DOI: https://doi.org/10.5370/KIEE.2020.69.11.1785

[11] Manitoba Hydro International, Ltd., "Mutual Impedance with Earth Return", *PSCAD X4(v4.6) Online Help*, https://www.pscad.com/webhelp/EMTDC/Transmission_Lines/Mutual_Impedance_with_Earth_Return.htm

[12] G. Lucca, "Mutual impedance between an overhead and a buried line with earth-return," in Proc. Int. Electr. Eng. *9th Int. Conf. EMC*, 1994, pp. 80-86. DOI: https://doi.org/10.1049/cp:19940679

[13] Radio Research Agency, The technical regulation on the ground installation, line facilities, customer premises and telecommunication tunnel, *RRA Noitce No. 2020-10* 2020. 11. 3.

[14] Constantine A. Balanis, ADVANCED ENGINEERING ELECTROMAGNETICS, WILEY, pp. 138-143, 2012.

이 상 무(Sangmu Lee) [정회원]

- 2000년 8월 : 한국정보통신대학원 대학교 정보공학과 (공학석사)
- 2013년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 2013년 9월 ~ 2017년 8월 : 과학기술연합대학원대학교 겸임교수
- 1991년 1월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

〈관심분야〉
전자기파