

지중 매설 강관의 전자유도 전파상수 계산 방식별 적용성 분석

이상무* · 최문환* · 조평동*

*한국전자통신연구원

Analysis on Several Calculation Methods of Propagation Constant for a Buried Metallic Pipe

Sangmu Lee* · Mun Hwan Choi* · Pyung-dong Cho

*Electronics and Telecommunications Research Institute

E-mail : sangmu@etri.re..kr

요 약

매설강관에 대한 전파상수는 대지도전율에 의한 매질 영향을 받기 때문에 대기중에서의 해석과 같이 않고 복잡한 초월식을 풀어야 하는 어려움이 있다 이러한 매설관에 대한 전파상수 해석에 관하여는 Wait의 논문에서 연구되어 있고 이것을 근간으로 일본과 미국에서 각각 전송선 이론에 의한 초월식을 실용적으로 수립하여 제시하고 있다 본 논문에서는 매설 강관에 대한 몇 가지 다른 형태의 전파상수 계산식에 대하여 시뮬레이션을 통한 값을 다루어 보고 유도전압에 대하여 적절한 산출 적용이 되는 지 검토하여 본 바 정확한 계의 해석에 의한 것과Wait 근간의 일본 방식에 의한 계산 값이 유사한 것으로 도출되었다.

ABSTRACT

There are a few formula for calculation of propagation constant of buried pipeline. These formula are basically based on the Wait's analytical expressions. Each transformed expression is from America and Japan. And also a propagation constant calculated by a developed bidirectional search algorithm for an application to an exact solution of underground fields represented. This solution is presented by Bridge's article. So several methods are used and values by them are compared whether they are appropriate to estimate an induction voltage. Japan's formula and exact solution are similar to apply for calculation of propagation constant.

키워드

전자유도, 전자파, 매설 강관, 전파상수, 유도 전압

1. 서 론

전자파의 전달 해석에 있어서 마이크로파와 같이 인위적인 목적 경로를 취하도록 시설하는 다양한 웨이브 가이드들이 활용될 수 있고 이러한 각 경우들에 있어서 급속 도체관 내의 전파상수를 풀어서 전달 효율을 올리도록 설계하는 것이 통례이다. 특정 목적 설계의 전자파 전달 매체에 원통형 도체 시설에 대한 전자파 전달 특성에 대한 것도 오래전에 연구되어 온 바 있다 일반 도체를 통하여 전파되는 여기 효과는 효율적이지 않지만 상용 전력 주파수에 의한 전자유도 장에

를 해석하는 데에 있어서는 전력선과 관련된 전파상수를 계산할 필요가 있고, 다른 차폐 시설물에 2차 유도되는 특성을 알기위해서도 이러한 과정이 요구되는데, 특별히 본 논문에서 다루고자 하는 것은 공중의 전력선에 의하여 지중에 매설된 철재 강관이 받는 2차 방사 특성에 의하여 공중으로 재투과된 차폐 영향 특성을 해석하려면 강관을 타고 전달되는 전파상수를 계산하는 방법을 찾아내는 데에 있다.

매설관에 대한 전파상수 해석에 관하여는Wait의 논문에서 연구되어 있고 이것을 근간으로 일

본과 미국에서 각각 전송선 이론에 의한 초월식을 실용적으로 수립하여 제시하고 있다 또한, Bridge에 의하여는 매설 전선의 적분 방법에 의한 전자계를 구하는 방법내에 전파상수를 양방향 반복법으로 구하는 형태를 취할 수 있도록 하고 있다.

본 논문에서는 일부 실제 현장의 구성에 대하여 이러한 개발된 전파상수 계산식을 적용하여 실제 요구되는 강관의 적정한 유도전압 산출이 이루어지는지 각각의 방법에 의하여 시뮬레이션된 결과들을 비교하여 보았고 실질적으로 적합한 계산 적용을 이룰 수 있는 지를 검토하였다

II. 매설관의 전파상수 계산 방식

1. Wait에 의한 원론식

Wait의 해석 논문에 의하면 매설 선조에 대한 전파상수 계산 방식을 다음과 같은 해석식으로 전개하고 있다[1].

$$E_z \approx A e^{-\Gamma z} (k^2 + \Gamma^2) \left\{ K_0 [i(k^2 + \Gamma^2)^{1/2} \rho] + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda) \frac{e^{-2u\lambda}}{u} d\lambda \right\}$$

$$\Gamma^2 + k_c^2 = \frac{\epsilon_c}{\epsilon} \frac{p}{b^2 \ln(b/a)} \frac{K_0(p)}{K_1(p)} (1 + \Delta)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} \frac{1}{K_0(p)} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\lambda) \frac{e^{-2u\lambda}}{u} d\lambda$$

2. 일본에서의 계산 방식

일본의 보고 방식에 의하면 다음과 같은 전개식으로 전환하고 있다[2].

$$Z(\Gamma) = Z_i + \frac{j\omega\mu_c}{\pi y \gamma^2} \left\{ \Gamma K_1(\Gamma y) - \sqrt{\gamma^2 - \Gamma^2} K_1(y \sqrt{\gamma^2 + \Gamma^2}) \right\} [\Omega/m]$$

$$Y(\Gamma) = \frac{1}{\frac{1}{Y_i} + \frac{K_0(\Gamma y)}{\pi(\sigma + j\omega\epsilon)}} [S/m]$$

$$Z_i = -\frac{A^2}{2\pi k D x_2} \{ I_0(x_2) K_1(x_1) + I_1(x_1) K_0(x_2) \}$$

- Zi : 관로의 내부 임피던스[Ω/m]
- Yi : 관로와 대지의 접촉 어드미턴스[S/m]
- r2 : 매설관 외부 반경[m]
- d : 매설 깊이[m]
- μc : 대지의 투자율[H/m]
- σ : 대지도전율[S/m]
- ε : 대지의 유전율[F/m]
- K0 : 제2종 0차 변형 베셀함수
- K1 : 제2종 1차 변형 베셀함수

3. Bridge 계의 해석

Bridge에 의하면 그림 1과 같은 매설 케이블의 파라미터 관계에서 아래의 계의 해석식으로부터 전파상수를 계산할 수 있도록 하고 있다[3].

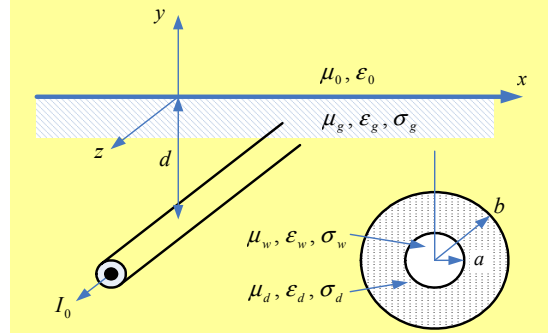


그림 1. Bridge 해석 방법 구성

$$\langle E_z^{ext}(k_z) \rangle_{\rho=b} = \left\langle \left[\nabla \nabla \cdot \Pi^g + k_g^2 \Pi^g \right] \hat{z} \right\rangle_{\rho=b}$$

$$= \frac{-i\omega\mu_g}{2\pi k_g^2} \frac{I_0}{(\tau_g b) K_1(\tau_g b)} \left\{ \left[\tau_g^2 K_0(\tau_g b) - I_0(\tau_g b) \right] \left[\tau_g^2 K_0(\tau_g 2d) + k_g^2 J(k_z, 0, -d) - k_z^2 G(k_z, 0, -d) \right] \right\}$$

$$J(k_z, x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{U_0 + U_g} e^{+i\lambda x + U_g(y-d)} d\lambda$$

$$G(k_z, x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{n^2}{n^2 U_0 + U_g} e^{+i\lambda x + U_0(y-d)} d\lambda$$

$$U_0 = \sqrt{\lambda^2 + \tau_0^2}, \quad U_g = \sqrt{\lambda^2 + \tau_g^2}$$

$$\tau_0 = \sqrt{k_z^2 - k_0^2}$$

$$\tau_g = \sqrt{k_z^2 - k_g^2}$$

kz가 전파상수이다.

4. 미국에서의 계산식

미국에서의 강관 연구보고서에 의하면 아래의 산식으로 전개하고 있다[4].

$$\gamma^2 \left[\frac{1}{Y_i} + \frac{\ln\left(\frac{1.12}{\gamma a'}\right)}{\pi(\sigma + \omega\epsilon)} \right] = Z_i + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{1.85}{a' \sqrt{\gamma^2 + j\omega\mu_0(\sigma + j\omega\epsilon)}} \right]$$

$$Z_i = R_i + jX_i [\Omega/m]$$

$$R_i = \frac{R_s}{(2\pi)(0.0127D)} \left[\frac{\sinh(t_n) + \sin(t_n)}{\cosh(t_n) - \cos(t_n)} \right]$$

$$X_i = \frac{R_s}{(2\pi)(0.0127D)} \left[\frac{\sinh(t_n) - \sin(t_n)}{\cosh(t_n) - \cos(t_n)} \right]$$

$$R_s = \sqrt{\pi\mu_s \rho_s f}$$

$$t_n = 0.0508 \times \frac{t R_s}{\rho_s}$$

III. 각 식에 대한 시물레이션

1. 일본의 계산식

전송선로 해석으로 적용하므로 전파상수는 다음의 식에 의하고 반복법에 의하여 수렴값을 찾아야 한다.

$$\gamma = \sqrt{Z_L Y_L}$$

해를 찾는 과정인 수렴 확인 시물레이션 그래프는 그림 2와 같다.

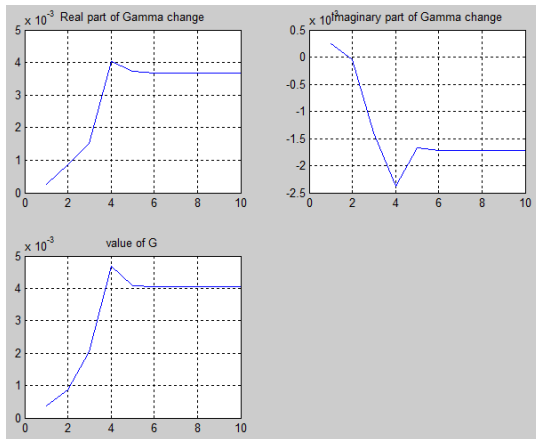


그림 2. 전파상수 수렴 시물레이션

결과값은 $\gamma=0.0037-j0.0017$ [1/m] 이다.

2. Bridge 방식에 의한 알고리즘

매설 관에 대한 전파상수를 구하는 것은 모두 초월식이어서 일반적인 방정식 해법으로는 구할 수 없고 예를 들어 뉴턴의 미분 적용에 의한 반복법을 사용하여야 한다.

Bridge 해석계에 적용하여 전파상수를 구하는 방법은 계의 식을 직접 초기값에서부터 수렴하는 값으로 매질의 경계조건을 만족하는 전파상수를 그림 3에서와 같은 복소 평면에서 반복법으로 직접 찾는 양방향 탐색 알고리즘 프로그램을 구동하는 것이다[5].

이 식의 결과에 의하면 탐색 회수의 값은 표 1과 같이 된다.

10회까지 복소 평면 경계에서의 교차 원점을 찾은 수렴값은 $\gamma=26.6236+j29.0639$ [1/m]이다.

3. 미국식의 계산값

미국 계산식으로 처리하여 보면 전파상수는 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma = -(4.5255+j3.9516) \times 10^{-9} \text{ [1/m]}$$

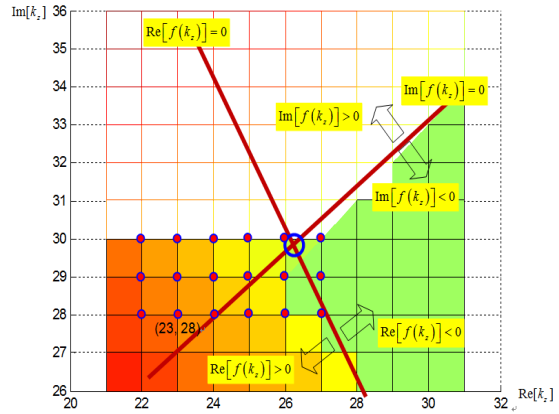


그림 3. 전파상수 탐색 경계 복소 평면

표 1. Bridge 반복법에 의한 전파상수 계산 결과

Iteration 수	Bisection 간격	$k_z = \text{Re}[k_z] + j \text{Im}[k_z]$
itr = 1;	kzk0 re step = 5;	kzk0 pivot = 31.0000 +26.0000i
itr = 2	kzk0 re step = 1;	kzk0 pivot = 27.0000 +29.0000i
itr = 3	kzk0 re step = 0.2000	kzk0 pivot = 26.8000 +29.0000i
itr = 4	kzk0 re step = 0.0400	kzk0 pivot = 26.6800 +29.0800i
itr = 5	kzk0 re step = 0.0080	kzk0 pivot = 26.6240 +29.0640i
itr = 6	kzk0 re step = 0.0016	kzk0 pivot = 26.6240 +29.0640i
itr = 7	kzk0 re step = 3.2000e-004	kzk0 pivot = 26.6240 +29.0640i
itr = 8	kzk0 re step = 6.4000e-005	kzk0 pivot = 26.6236 +29.0639i
itr = 9	kzk0 re step = 1.2800e-005	kzk0 pivot = 26.6236 +29.0639i
itr = 10	kzk0 re step = 2.5600e-006	kzk0 pivot = 26.6236 +29.0639i

III. 수치 적용성 비교

1. 비교 Plane

각 값의 실제 유도 환경상의 매설관 차폐효과 수치로서 비교하기 위하여 그림 4와 같은 관계에서 전송선 이론에 의한 차폐계수 산식을 이용한다.

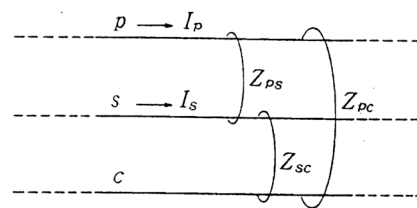


그림 4. 무한장 유도 환경 관계도

$$K = \lambda_0 + (1 - \lambda_0) \frac{1 - e^{-\gamma l}}{\gamma l} = \lambda_0 + E(1 - \lambda_0)$$

$$\lambda_0 = 1 - \frac{Z_{PS} Z_{SC}}{Z_S Z_{PC}}$$

2. 계산 차폐계수 비교

각각의 계수 계산 결과를 정리하면 표 2와 같

이 된다.

표 2. 계수 계산 결과 비교표

구분	전파상수(γ)[1/m]	차폐계수(K)
Wait	0.0037-j0.0017	0.893
미국	$-(4.526+j3.952)\times 10^{-9}$	1
Bridge	26.624+j29.064	0.857

V. 결 론

Wait의 해석식을 기반으로 하여 일본에서 개발한 매설 강관에 대한 전파상수를 계산식과 Bridge의 정확한 계의 해석식에 대하여 직접 알고리즘을 활용하여 전파상수를 구한 결과값을 전송선로 방정식에 의한 강관의 차폐계수 산식에 대입하여 풀어본 결과 Wait 방식에 의한 계수치는 0.893, Bridge 계에 대한 산출 알고리즘을 도입하여 적용한 계수치는 0.857로서 유사한 결과가 나왔다. 미국의 식에 대한 것은 약간 다르게 표현되어 있고 초월식을 풀어야 하는 상용 프로그램 이용시의 적용 오류가 있어서 추후의 검토가 필요하다.

그런데 Wait 방식에 의한 전파상수값과 Bridge 방식에 의한 전파상수 값이 크에 다름에도 유사한 차폐 효과 결과가 나온 것은 좀 더 심층적인 해석 시뮬레이션을 통하여 전파상수 특성을 파악해 보아야 할 필요가 있는데, 전파상수를 계산하는 복소 함수내의 베셀함수 이용식에 의하면 수치 범위가 다르더라도 원통 좌표계에서의 전자파 전달 함수 형태는 교류 신호에 의한 주기적 특성을 가지고 있어서 결국은 일정한 범위안의 값으로 수렴해 들어오게 되는 것으로 유추된다.

Acknowledgement

"본 연구는 방송통신위원회의 지원을 받는 방송통신표준기술력향상사업의 연구결과로 수행되었음"

참고문헌

[1] J. R. Wait, "Electromagnetic wave propagation along a buried insulated wire," Can. J. Physics, Vol.50, pp. 2402-2409, 1972

[2] 일본전기학회/전자정보통신학회, 「전자유도대책의 개요 및 최신 기술」, 유도조사특별위원회 보고서, 1987. 9., (제4장 환경차폐효과 - 4.4.2 관로정수의 계산방법)

[3] Greg E. Bridges, "Fields Generated by Bare and Insulated Cables Buried in a Lossy Half-Space", IEEE Transactions on

Geoscience and Remote Sensing, Vol.30, No.1, IEEE, pp.140-146, Jan. 1992

[4] IIT RESEARCH INSTITUTE, "Mutual Design Considerations for Overhead AC Transmission Lines and Gas Transmission Pipelines": Volume I. Engineering Analysis, EL-904 Research Project 742-1, Final Report, Sep.1978, pp.(2-5)-(2-6)

[5] Sangmu Lee, Jae Hyun Lee, Pyung-dong Cho, "Calculation of electromagnetic propagation constant for a buried cable", EMC Europe 2012, Sep.26, 2012