

전기철도 터널 및 고가 구조물의 차폐계수 산정에 대한 연구

A Study on the Determination of the Screening Factors for the Tunnel and the Overbridge of the Electric Railway

최경* · 이 향 범* · 김 형 석** · 김 학 철***

(Kyung Choi · Hyeong-Seok Kim · Hyang-Beom Lee · Hak-Cheol Kim)

Abstract - For the screening factor of the tunnel and overbridge structure in the electrified railway, the ITU-T regulation denotes only a theoretical estimation method, and the actual numeric values are notified differently by the official announcement of each nations. In this study, the factors which can affect the screening factor are investigated and analysed by FEM and a suitable calculation method based on multi-conductor line theory for the current pre-estimation formula for the induction noise voltage in the national notice is presented. The case studies are performed using the real data of the tunnel and the overbridge of the electrified railway, and a satisfactory formula for the determining of screening factor is derived.

Key Words : Screening factor, Tunnel, Overbridge, Electric railway

1. 서 론

전기철도에서 발생하는 전력유도전압의 수치를 예측계산하기 위한 산출식에 사용되는 터널 및 고가 구간의 차폐계수는 국제규격(ITU-T directive)[1]에 기본적인 이론이 소개 되어 있으나 기본 차폐선과 레일, 케이블 쉴드에 대한 대략적인 그래프만 제시 되어 있을 뿐, 터널 및 고가 구조물에 대한 차폐계수 계산에 대한 언급은 없다. 일본에서는 1981년 터널내 다수도체를 2개의 등가 차폐선으로 치환하여 간략히 계산하는 방안[2]을 제시하여 사용하고 있고 고가구조물에 대해서는 1979년 해면상에 있는 교량의 차폐계수 계산 이론을 세우고 실측과 비교한 사례가 있다[3]. 다른 나라에서도 전기철도의 터널과 고가 구조물에 대한 최근 차폐계수 연구는 거의 없으나, 터널의 경우 낮은 주파수에서 표피효과(skin effect)를 무시할 정도이면 터널에 의한 영향이 1% 미만이며 표피효과가 커질 때 상호임피던스의 변화가 20%까지 도달할 수 있다는 연구 결과가 있다[4-5]. 이는 터널의 도전율의 변화나 포함되는 도체의 구성도에 따라 차폐효과가 변한다는 것을 말하고 있다.

각 나라에서 사용되는 차폐계수 수치는 현재와 같은 터널 및 고가 구조물 공법이 적용되기 전에 제정되었고 컴퓨팅 파워가 부족하여 현대 터널 및 고가 구조물의 특성을 정밀하게 나타내고

있지 못하다. 본 논문에서는 우리나라 전기철도 터널 및 고가 구조물의 차폐계수 재정립 과정에 적용된 이론과 부가적으로 고려했던 요소들을 제시하고 그 영향을 분석하였으며, 실제 구조물의 데이터를 이용하여 정확한 예측 계수식을 도출하는 과정을 나타내었다.

2. 본 론

고시[6]에 명시된 유도잡음전압 계산식은 식 (1)과 같다. 전력 유도 방지조치를 하여야 하는 기준값은 2.5mV 이상이거나 0.5~2.5mV 내 값으로 1분 동안 지속 시간을 곱한 값이 30 mV·s 을 초과한 경우이다.

$$V_n = \sum (j\omega_n \cdot \frac{AmpKm_n}{D}) \cdot J_p \cdot M_n \cdot l \cdot K \cdot \lambda \times 10^{-3}. \quad (1)$$
$$K = K_{3n} \cdot K_4 \cdot K_6 \cdot K_8$$

여기서, K_4 가 터널의 차폐계수이며, K_6 가 고가차폐계수이다. 차폐계수는 다음과 같이 정의된다.

$$K = \frac{\text{result of the induction with screening effects}}{\text{result of the induction without screening effects}} \quad (2)$$

차폐계수는 복소수로 계산되지만 유도전압 계산에 적용될 때는 $0 \leq K \leq 1$ 의 값을 갖는 실수로 적용하고 있다.

2.1 터널 차폐계수에 영향을 주는 요소 분석

터널 및 고가 구조물은 철근 콘크리트로 구성되며, 토양으로

† Corresponding Author : Dept. of Electronics Engineering, Kangwon National University, Korea.
E-mail: kyunchoi@kangwon.ac.kr

* School of Electrical Engineering, Soongsil University.

** Daeyoung Ubi-Tech.

***Dongnam E&S

Received : July 31, 2018; Accepted : August 30, 2018

일부 덮여있을 수 있어 복잡한 차폐 영향이 있을 수 있다. 이들 구조물이 전자유도에 미치는 영향을 알아보기 위해 먼저 유한요소법 해석을 통해 차폐에 영향을 미치는 요소를 조사하였다.

그림 1은 유한요소법을 적용하기 위한 메쉬 구조에서 터널 구조물 영역만을 나타낸 것이다. 콘크리트 안의 철골은 Skin Depth가 짧으므로 더욱 세밀하게 분할하도록 한다.

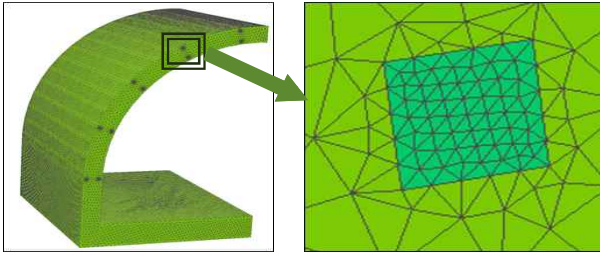
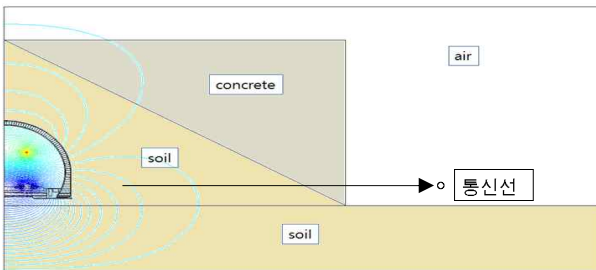
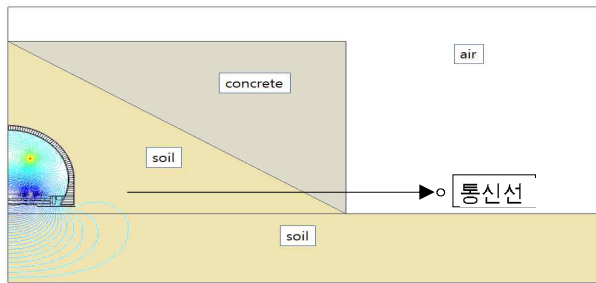


그림 1 터널의 유한요소 모델링
Fig. 1 The finite element mesh of the tunnel structure



(a) 터널 구조체의 철골을 고려하지 않은 경우 자계 분포
(a) The magnetic field without iron frames in the tunnel



(b) 터널 구조체의 철골을 고려한 경우 자계 분포
(b) The magnetic field with the iron frames in the tunnel

그림 2 터널 구조에서의 자계 분포
Fig. 2 The magnetic field distribution at tunnel structure

터널 외부는 도전율을 가진 토양이나 콘크리트로 덮여 있는 경우까지를 고려하였다. 계산 결과는 표 1에 나타낸 바와 같다. 본 표에서의 토양 및 대지의 도전율은 0.07 [S/m], 콘크리트의 도전율은 전국 대푯값으로 0.01 [S/m](저항률 100 [Ω/m])으로 적용하였고 도전율 변화에 따른 영향은 표 2에 다시 계산하였다.

콘크리트의 도전율이 토양의 값과 비슷하므로 계산 결과에서 보듯이 터널과 외부에 약간의 토양 혹은 콘크리트가 있더라도 그 영향은 별로 없음을 알 수 있다. 거리에 따른 자계의 분포를 그래프로 표현 해 보면 철근이 없는 경우, 콘크리트와 토양의 영향은 거의 무시할 정도였다(그림 3). 콘크리트의 도전율을 변화시켜 본 결과에서도 콘크리트가 가질 수 있는 범위 정도의 변화에서는 영향이 무시할 정도였다(표 2).

표 1 여러 조건에서의 터널 외부 자계 계산 값
Table 1 The magnetic fields by the factor variation

거리 (m)	Magnetic Field Intensity (A/m)				
	터널 없음	터널 콘크리트와 외부 토양이 있는 경우	터널콘크리트와 외부에 토양과 콘크리트가 있는 경우	터널의 종횡철근만을 고려한 경우	터널의 종횡, 횡단 철근을 모두 고려한 경우
0.1	20.605368	20.60547	20.603167	19.260466	19.264431
10	0.7094981	0.7090242	0.7090425	0.6447936	0.64054435
20	0.19625328	0.19686721	0.19677967	0.1755685	0.17650695
30	0.07139354	0.07120977	0.07124341	0.0632677	0.06343608
40	0.03014403	0.03011401	0.03014169	0.02659716	0.02658441
50	0.01369409	0.01369217	0.01369292	0.01206002	0.01206248

표 2 콘크리트 도전율 변화에 따른 외부 자계 변화 [A/m]
Table 2 The far-field values of the magnetic field intensity with the variation of conductivity of concrete [A/m]

거리 (m)	$\sigma_{\text{콘크리트}} [\text{S/m}]$				
	1	0.2	0.02	0.0699	0.002
30	0.298e-5	0.298e-5	0.298e-5	0.298e-5	0.298e-5
40	0.209e-5	0.209e-5	0.209e-5	0.209e-5	0.209e-5
50	0.155e-5	0.155e-5	0.155e-5	0.155e-5	0.155e-5
75	0.802e-6	0.802e-6	0.802e-6	0.802e-6	0.802e-6
100	0.446e-6	0.446e-6	0.446e-6	0.446e-6	0.446e-6
150	0.157e-6	0.157e-6	0.157e-6	0.157e-6	0.157e-6
200	0.888e-7	0.888e-7	0.888e-7	0.888e-7	0.888e-7

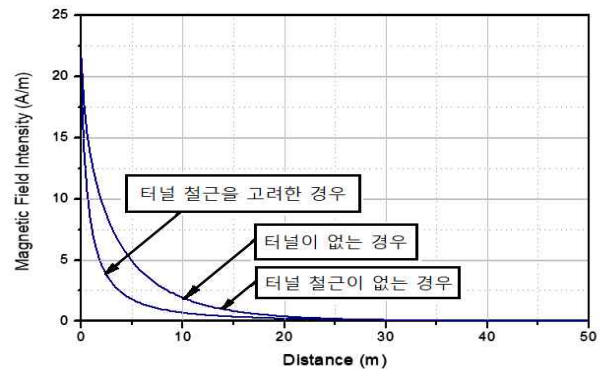


그림 3 거리에 따른 자계의 세기 변화
Fig. 3 Magnetic Field Intensity Graph

하지만, 철근의 투자율을 변화시킨 경우는 표 3과 같이 큰 변화를 가져오는데, 이는 투자율이 높은 강자성체가 자계의 영향을 받아 자속밀도를 증가시키기 때문이다. 즉, 투자율이 높을수록 쇄교 자속의 크기는 커지므로 전력유도에는 나쁜 영향을 미치게 된다.

표 3 철근의 투자율 변화에 따른 외부 자계의 변화 [A/m]

Table 3 The far-field values of the magnetic field intensity for the variation of the permeability of the iron mesh.

거리 (m)	비투자율 μ_r					
	1	400	1000	2000	3000	4000
30	0.245e-5	0.298e-5	0.441e-5	0.538e-5	0.618e-5	0.669e-5
40	0.141e-5	0.209e-5	0.307e-5	0.362e-5	0.413e-5	0.446e-5
50	0.900e-6	0.155e-5	0.226e-5	0.261e-5	0.296e-5	0.319e-5
75	0.388e-6	0.802e-6	0.115e-5	0.128e-5	0.143e-5	0.155e-5
100	0.209e-6	0.446e-6	0.633e-6	0.687e-6	0.768e-6	0.828e-6
150	0.761e-7	0.157e-6	0.220e-6	0.234e-6	0.261e-6	0.281e-6
200	0.437e-7	0.888e-7	0.124e-6	0.131e-6	0.146e-6	0.157e-6

그러므로 구조물에 사용되는 철근의 투자율을 정확히 적용하는 것이 필요하였다. 본 연구에서 콘크리트 구조물을 만들 때 사용하는 건축자재인 이형봉강의 투자율을 측정된 결과는 그림 4와 같다.

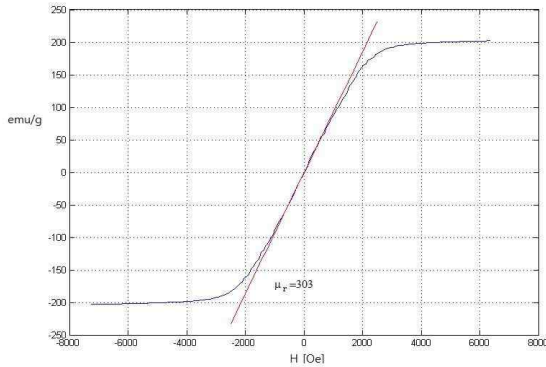


그림 4 이형봉강 비투자율 측정 및 적용치 계산

Fig. 4 The relative permeability of the iron deformed bar

철근에 인가되는 자계의 세기는 비교적 적기 때문에 원점 근처에서 접선을 이용하여 비투자율을 구하였다. 측정된 이형봉강의 비투자율은 저밀도 영역에서 300 내외가 되었다. 비교적 비투자율 치가 낮아, 기존 계산에서 적용하던 값과 크게 틀리지 않았으며, 이전의 계산치 값들에 크게 영향을 주지는 않는 것으로 볼 수 있었다.

철근 콘크리트 구조물에 적용되는 철근의 수는 매우 많으므로 유효요소법으로 이 영향을 모두 고려하는데는 한계가 있다. 그러므로 다음의 다도체 방법을 이용하여 차폐계수를 계산하는 것이 바람직하다.

2.2 다도체 차폐이론

기유도원과 통신선간에 연속접지가 된 차폐선로가 있다면 이 차폐선에 유기되는 유도전류에 의해 통신선에 유기되는 유도전압의 양이 감소된다. 차폐선로는 주기적으로 접지가 되어 있어야 하는데, 이는 교류 급전인 경우 유기되는 차폐선 전류의 방향이 교번하므로 적절한 귀환회로가 구성되어야 제대로 작동하기 때문이다. 대체적으로 접지의 간격은 급전 전원의 $\lambda/4$ (λ : 급전 전원의 파장) 이하가 되어야 하는데, 60Hz 전원을 사용하는 시스템이고 접지 간격은 고속철 터널 및 교량의 경우 철도시설표준[7]의 접지계통도에 의하면 횡단 접속선과 보조횡단접속선을 750m 마다 연결(공통 횡단 접속선은 1,500m 간격, 일반철도의 경우 750~1,000m)하고, 터널인 경우 구조체와의 접지를 250m마다 선형 매설접지선에 연결하고, 교량의 경우 단독 접지되는 경간의 거리가 평균 45m 정도이므로 이 조건은 충족되고 있다.

단일차폐선의 경우 차폐계수 K는 선로간 유기되는 상호인덕턴스의 값에 의해 유기되는 전압식 (3)을 이용하여 유도하면[1],

$$V_t = M \frac{dI_s}{dt} = j\omega M I_s = Z_s I_s \quad (3)$$

$$K = \frac{V_t - V_t'}{V_t} = 1 - \frac{Z_{t1} \cdot Z_{e1}}{Z_{t1} \cdot Z_{e1}} \quad (4)$$

Z_{e1} : 기유도원과 통신선간의 상호인피던스(= $j\omega M_{e1}$)

Z_{e1} : 기유도원과 차폐간의 상호인피던스(= $j\omega M_{e1}$)

Z_{t1} : 차폐선과 통신선간의 상호인피던스(= $j\omega M_{t1}$)

Z_{t1} : 차폐선의 대지귀로 자기인피던스 (= $R_{t1} + j\omega L_{t1}$)

로 계산된다. 자기인피던스의 항에는 직렬저항값이 포함되어 유도전류값에 영향을 준다. 차폐선의 위치에 대한 조건을 알아보면, 유도원의 상하좌우 4곳에 설치된 차폐선에 의한 차폐계수를 계산해 보았을 때, 차폐선의 위치가 기유도원과 피유도원 사이 뿐 아니라 상하, 혹은 외측에 설치된 경우에도 근사한 차폐효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 차폐선은 유효거리 이내의 모든 도체를 모두 고려하여야 한다.

표 4 차폐선위치에 따른 차폐계수 변화 비교

Table 4 The value of screening factor by the different position of the screening line

차폐선의 위치	차폐계수
기유도원에서 피유도원으로 1m 지점	0.3619
기유도원에서 피유도원 반대편으로 1m 지점	0.3559
기유도원 위 1m 지점	0.3584
기유도원 아래 1m 지점	0.3588

차폐선이 2개 있는 경우의 차폐계수를 유도하면,

$$K_{1,2} = \frac{E_t}{E_t'} = 1 - \frac{Z_{t1}(Z_{e1}Z_{t2} - Z_{e2}Z_{t2}) + Z_{t2}(Z_{e2}Z_{t1} - Z_{e1}Z_{t1})}{Z_{t1}(Z_{t1}Z_{t2} - Z_{t2}^2)} \quad (5)$$

로 되는 데 이 식은 ITU-T에 나와 있는 표준식[1]과 같다.

여기서, 두 개의 차폐선이 매우 근접하여 n[turn]으로 증가하는 경우를 알아보면, 위 식에서, $Z_{e1} = Z_{e2}$, $Z_{11} = Z_{21}$, $Z_{12} = Z_{22} \approx Z_{12}$ 인 경우로 볼 수 있으므로,

$$K_{1,2} = K_{1,1} = \frac{E_t}{E_e} = 1 - \frac{Z_{11}(Z_{e1}Z_{11} - Z_{e1}Z_{12}) + Z_{12}(Z_{e1}Z_{11} - Z_{e1}Z_{12})}{Z_{et}(Z_{11}Z_{11} - Z_{12}^2)}$$

$$= 1 - \frac{2Z_{11}Z_{e1}(Z_{11} - Z_{12})}{Z_{et}(Z_{11} - Z_{12})(Z_{11} + Z_{12})} = 1 - \frac{2Z_{11}Z_{e1}}{Z_{et}2Z_{11}} = 1 - \frac{Z_{11}Z_{e1}}{Z_{et}Z_{11}} \quad (6)$$

로 되어 1개의 차폐선만 있는 경우와 근사하게 되므로 근접하게 turn 수를 올리는 개념은 효과가 미미하다. n개의 차폐선이 묻혀 차폐선의 단면 굵기가 커지는 효과를 GMR 근사식[1]을 이용하여 적용할 수 있으나, 이 효과를 차폐계수 계산에 적용하여도 그림 5와 같이 큰 효과는 얻지 못하므로 투자되는 시설비의 증가에 비해 차폐효과의 향상은 기대에 못 미치는 것으로 나타났다. 철근 등에 의한 차폐선의 반지름 증가는 직렬저항의 감소로 이득을 줄 수 있지만, 차폐선에 흐르는 유도전류의 값이 크지 않고, Skin Depth가 2cm 내외이므로 철근의 굵기 증가에 따른 직렬저항의 감소가 차폐에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

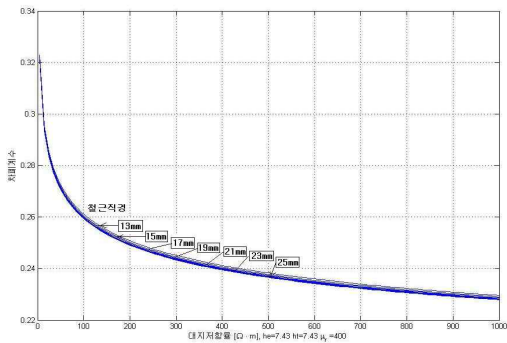


그림 5 터널 구조 차폐선 굵기에 따른 차폐효과 변화
Fig. 5 The variation of screening factor according to the sectional area of the screening line

그러므로, 차폐효과는 서로 다른 위치에 존재하는 차폐선의 개수에 비례하여 커지게 되는데, 이 효과를 고려하기 위하여 n개의 차폐선에 대한 차폐계수 계산식을 유도하면,

$$E_t = Z_{te}I_e + Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1n}I_n$$

$$0 = Z_{1e}I_e + Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1n}I_n$$

$$0 = Z_{2e}I_e + Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 + \dots + Z_{2n}I_n$$

$$\vdots$$

$$0 = Z_{ne}I_e + Z_{n1}I_1 + Z_{n2}I_2 + \dots + Z_{nn}I_n$$

& $E_e' = Z_{te}I_e$

첫 식에 대하여

$$K = \frac{E_t}{E_e} = 1 + \frac{Z_{11}I_1}{Z_{te}I_e} + \frac{Z_{12}I_2}{Z_{te}I_e} + \dots + \frac{Z_{1n}I_n}{Z_{te}I_e}$$

$$= 1 + \frac{1}{Z_{te}} [Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1n}] \frac{1}{I_e} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

2~n+1식에 대해서 첫 항을 왼 편으로 넘겨 최종식을 구한다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = -I_e \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{1e} \\ Z_{2e} \\ \vdots \\ Z_{ne} \end{bmatrix}$$

$$\therefore K = 1 - \frac{1}{Z_{te}} [Z_{11}, Z_{12}, \dots, Z_{1n}] \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Z_{1e} \\ Z_{2e} \\ \vdots \\ Z_{ne} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3. 현행 터널 모델의 차폐계수 계산

터널 구조의 차폐가 주로 종행 철근의 수와 배치에 관계되는 것을 알았기 때문에 실제 터널의 철근 배치와 개수에 대한 차폐계수의 변화를 검토하였다. 터널의 일반적 철근 배치는 그림 6과 같다.

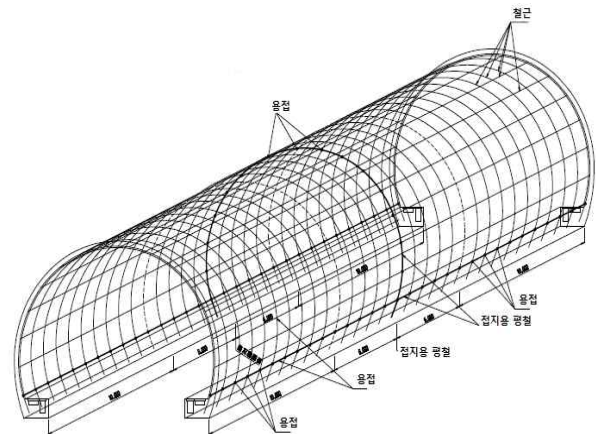
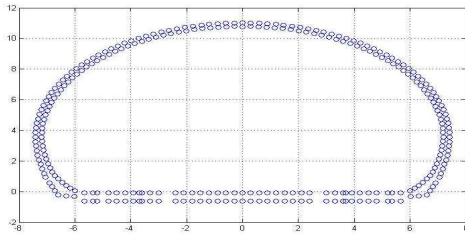


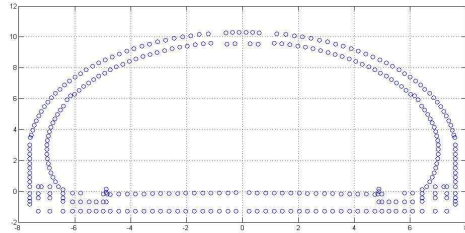
그림 6 터널의 철근 배치도
Fig. 6 The iron mesh of the tunnel

터널 차폐효과에 대한 터널의 종철근 개수에 대한 영향을 알아보기 위해 서로 다른 종철근 갯수를 갖는 5개의 터널에 대한 차폐계수를 계산하여보았다. 여기서 분석에 사용된 각 터널의 종행 철근 배치의 단면도는 그림 7과 같다.

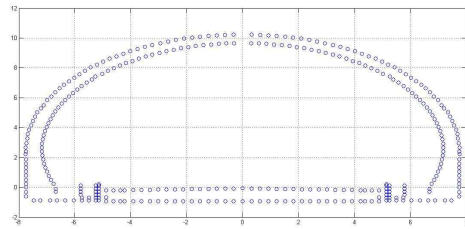
각 구조에서 계산된 차폐계수 절대치의 대지저항률에 대한 결과 값은 대체로 그림 8의 (a)의 ① 곡선이 된다. 그러나, 터널의 차폐계수를 구할 경우, 예측계산[8]에 포함돼 계산되는 기본 차폐선의 영향을 감해야 한다. 차폐계수는 식 (1)에서, 별도의 곱셈으로 적용되기 때문에 터널의 차폐계수 산정에서는 기본 차폐선을 포함한 차폐계수를 구하고 기본차폐선에 의한 영향을 곱셈 비율로 제거하여야 한다.



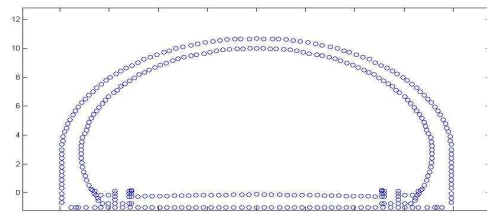
(a) A-터널 종철근배치도 (294개 철근)
(a) A-tunnel iron position (294 EA)



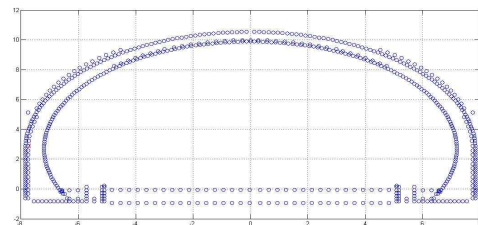
(b) B-터널 종철근배치도 (314개 철근 위치)
(b) B-tunnel iron position (314 EA)



(c) C-터널 종철근배치도 (332개 철근위치)
(c) C-tunnel iron position (332 EA)



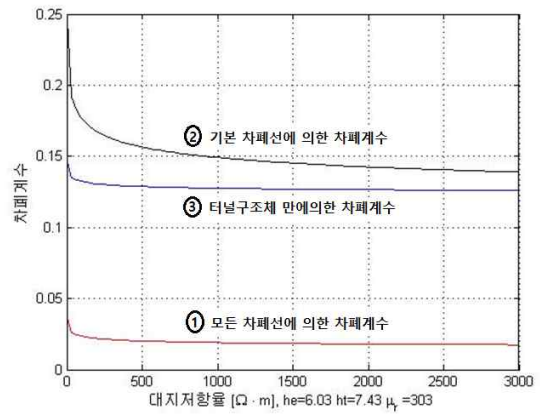
(d) D-터널 종철근배치도 (340개 철근 위치)
(d) D-tunnel iron position (340 EA)



(e) E-터널 종철근배치도 (650개 철근 위치)
(e) E-tunnel iron position (650 EA)

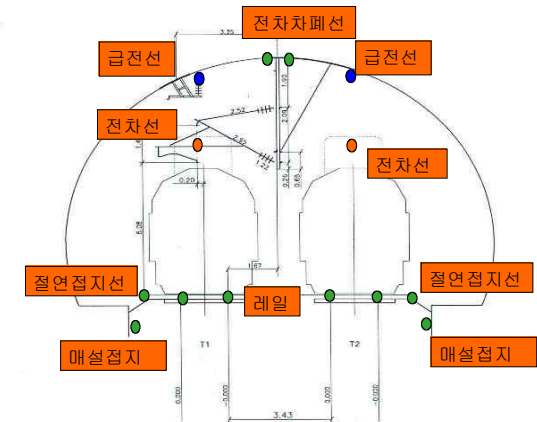
그림 7 각 터널의 종행 철근 위치도

Fig. 7 The longitudinal iron position of the each tunnel



(a) 기본 차폐선을 고려한 터널의 차폐계수

(a) The rate of the screening factor with consideration of the basic screening lines.



(b) 터널에서의 기본 차폐선 (급전선, 전차선은 제외)

(b) The basic screening line in the tunnel

그림 8 기본 차폐선의 차폐계수와 터널 차폐계수 곡선

Fig. 8 The rate of the screening factor with the consideration of the basic screening lines

그러므로 터널에 의한 차폐계수는 ①곡선에서 ②곡선을 넘는 값인 ③ 곡선으로 정해야 한다. 이 때 기본 차폐선은 그림 8(2)에 나타난 것과 같이, 쌍으로 배치하는 전차차폐선, 타래도, 절연 접지선, 매설접지선이 포함되면 실 전류가 흐르는 급전선, 전차선은 제외하여야 한다. 매설접지선이 터널구간에는 2개이므로 기본 차폐선은 10개가 된다.

보정 계산된 각 터널의 차폐계수를 그림 9에 표시하였다. 원 곡선보다 대지저항율에 의한 영향이 많이 줄어든 것을 알 수 있다. 또한, 종 철근의 갯수가 현저히 많은 E-터널의 경우 현저하게 작은 값의 차폐계수를 가짐을 알 수 있다.

차폐계수의 종철근에 대한 영향을 수식화하기 위해 대지저항율 300 [Ω·m] 대의 차폐계수를 종철근 개수에 대해 그려보면 그림 10과 같다. 그림 10에서 차폐계수의 값은 종철근의 개수에

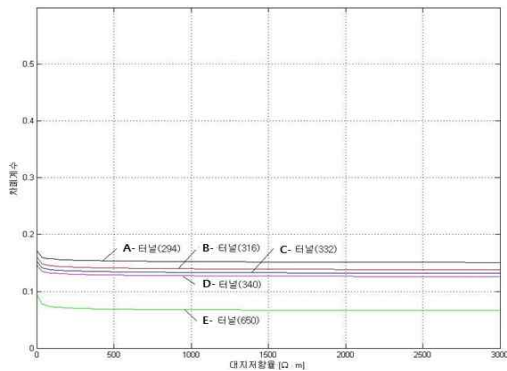


그림 9 터널 차폐계수 총람
Fig. 9 The screening factors of each tunnel

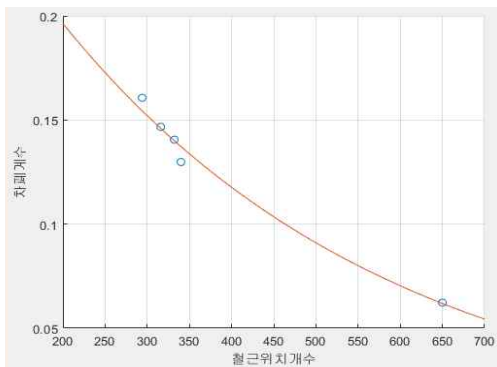


그림 10 터널 종횡 철근 개수에 대한 차폐계수 곡선
Fig. 10 The curve fitting of the screening factor over the number of screening lines in the tunnel

대해 감소하는 값을 가져오는 것을 잘 알 수 있다. 이 때 철근은 서로 매우 근접한 것의 영향은 적고, 전 구조물을 통해 비교적 균등히 분포 된 것이 계수를 줄이는 데 효과적이다.

위 분포를 curve fitting을 통해 수식을 알아보면 가장 적합한 식은

$$K_4 = ae^{-b \cdot N} \quad (10)$$

의 형태로 주어지고 이 그래프에서 a, b의 값은 각각 $a = 1.1$, $b = 0.0025$ 의 값이며 N은 종철근의 개수이다. 이 값은 위 예에서, 종철근 개수를 300개를 기준으로 할 때 10개의 종철근 개수의 증감에 대해 차폐계수에는 약 0.05의 변화를 가져오는 것으로 나타났다.

2.4. 고가구조물의 차폐효과 분석

고가구조의 모델링은 고가 상판의 강재만을 차폐선으로 하여 모델링 한다. 하부 구조체는 연속적으로 이어지는 종철근이 아니므로 제외한다. 계산결과 고가 구조도 마찬가지로 철근의 저항이나 굵기 변화에는 큰 영향이 없었으며, 철근 개수(위치), 투자율에 민감한 영향을 받았다. 특별히 고가 구조에서는 그림 11와 같이 고가의 높이가

높아지면 거리에 따른 유도전압 감소효과 이외에 차폐선의 상대적 근접성에 의해 비교적 큰 차폐효과를 나타낸다. 하지만, 지형의 변화에 따라 고가의 높이가 각각 다른 경우가 많으므로 적용하기에 어려움이 있다.

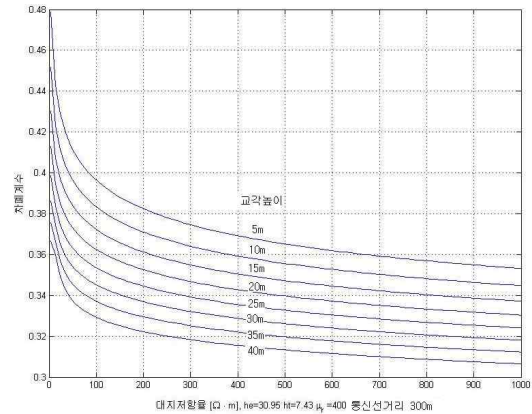


그림 11 고가 높이에 따른 차폐계수 변화
Fig. 11 The variation of screening factors according to the height of the overbridge

2.4.1 고가구조 접지처리

위 차폐선 식은 연속적으로 대지와 접지가 되어 있는 경우를 계산한 것이다. 고가구조는 교각에서만 대지접지가 가능하므로 이를 고려해 주어야 한다[1]. 이를 고려하여 식을 유도해 보면 아래와 같다. 차폐선이 기유도원과 평행하다고 할 때, 차폐선에 유기되는 전류의 양은

$$I_1 = - \frac{\overline{Z}_{1e}}{Z_{11} + \frac{Z_A + Z_B}{l_{AB}}} I_e = - \frac{\overline{Z}_{1e}}{Z_{11}} I_e \quad (11)$$

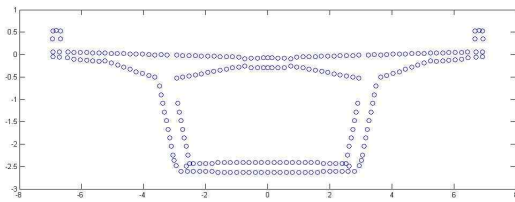
여기서 l_{AB} 는 경간 AB 간의 거리이다.

$\overline{Z}_{11} = Z_{11} + \frac{Z_A + Z_B}{l_{AB}}$ 이라 놓을 때, 차폐계수는

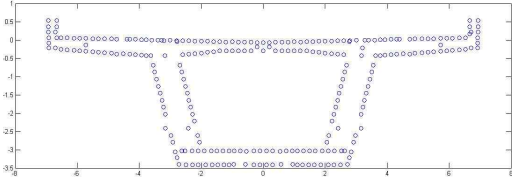
$$K = 1 - \frac{\overline{Z}_{1e} \cdot Z_{1t}}{Z_{et} \cdot \overline{Z}_{11}} \text{ 이 된다.} \quad (12)$$

교각이 25~40m 간격으로 설치되어 있는 구조에서 이 주기적 접지의 영향은 그림 13과 같다. 교각 경간 사이가 길지 않아 일반 접지의 차폐선 연결 간격보다 적고, 교각 하부의 접지가 내부 구조물에 의해 상당히 좋은 값을 갖기 때문에, 주기적 접지에 의한 차폐계수 값의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 고가의 높이는 당해 지형의 조건에 따라 각 교각 마다도 다른 값을 가지게 될 수 있어 약간의 변화가 있으나, 여기서는 표준적 차폐계수 산출을 위해 고가의 높이를 전국 평균인 36.53 m로 잡았다.

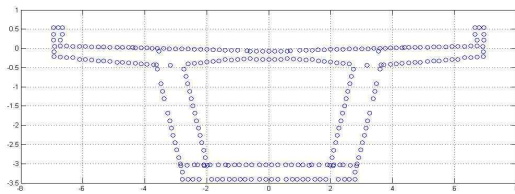
그림 14는 각 모델에서 구한 차폐계수 추이를 나타내고 있다.



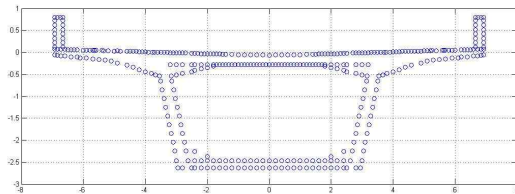
(a) A-고가 구조물 상단 철근 배치도 (238개 종행철근)
(a) A-Overbridge (238 EA)



(b) B-고가 구조물 상단 철근 배치도 (262개 종행철근)
(b) B-Overbridge (262 EA)



(c) C-고가 구조물 상단 철근 배치도 (270개 종행 철근)
(c) C-Overbridge (270 EA)



(d) D-고가 구조물 상단 철근 배치도 (364개 종행 철근)
(d) D-Overbridge (364 EA)

그림 12 실 고가 구조물의 종행 철근의 위치

Fig. 12 The position of longitudinal iron screening line in each overbridge model

이 그래프 역시 기본차폐선 영향을 제외한 결과인데, 고가의 경우는 기 계산되는 차폐선이 8개이다.

각 고가구조물의 차폐계수 분포를 역시 curve fitting을 통해 수식을 구해보면, 그림 15에서,

$$K_6 = c \cdot e^{-d \cdot N} \quad (12)$$

의 형태가 나오며, 이 때 a,b의 값은 각각 $c = 0.48$, $d = 0.00057$ 이 된다. 이 값은, 종철근 개수를 270개를 기준으로 할 때 10개

의 종철근 개수의 증감에 대해 차폐계수에는 약 0.007의 변화를 가져오는 것으로 나타났다.

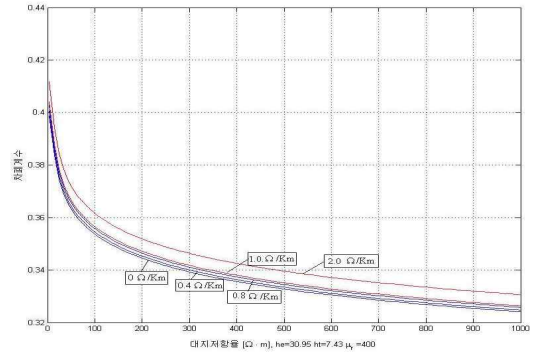


그림 13 교각의 접지를 고려하였을 때의 차폐계수 변화

Fig. 13 The variation of screening factor according to the periodic earthing parameters.

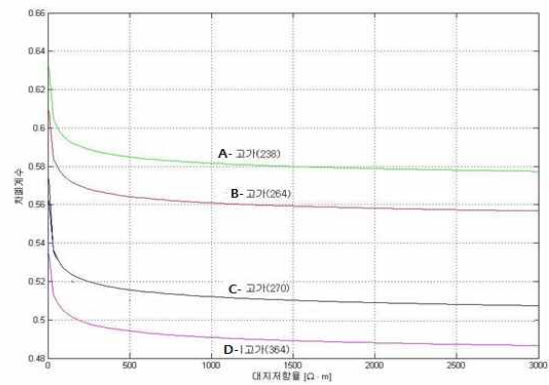


그림 14 고가 차폐계수 총람

Fig. 14 The screening factors of each Overbridge

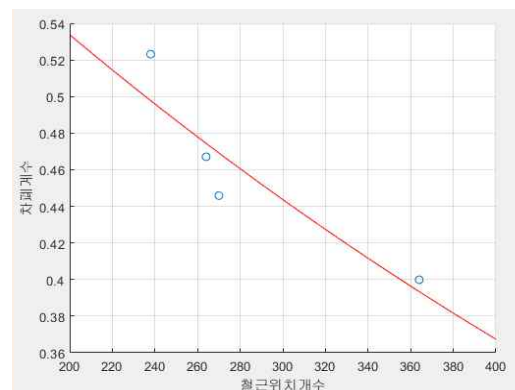


그림 15 고가 구조물의 철근 수에 대한 차폐계수 변화율

Fig. 15 The curve fitting of the screening factor over the number of screening lines in the overbridge model

3. 결 론

고속 전기철도에서 발생하는 유도전압 계산에 있어 터널 및 고가의 차폐효과에 영향을 주는 요소를 현대 철도시설물의 실제적인 모델링을 통하여 찾아보았다. 유한요소 해석 결과 구조물이 가질 수 있는 도전율에서의 콘크리트나 상부 토양의 영향은 무시할 수 있을 정도였다. 구조물에 포함되는 철근 구조에 대해서는 종행 유효 철근의 배치와 개수에 많은 영향을 받으며, 철근의 투자율이 커질 경우 차폐에는 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타났다. 단, 투자율에 대해서는, 구조물에서 사용되는 이형봉강의 투자율을 측정해 본 결과, 그 값이 크게 높지 않아 현재 계산 방법에 큰 변화를 주지 않아도 무방한 것으로 나타났다.

종행 철근을 고려한 차폐계수의 산정은 다도체 방법을 사용하는 것이 효율적인데, 현재 예측 계산을 수행 할 때 이미 기본 차폐선의 영향을 고려하여 계산하므로 고시에 제시된 식처럼 계수를 곱하는 형태의 수식에서는 기본차폐선의 효과를 뺀 계수를 곱의 비율 형태로 적용하여야 한다. 이 경우 대지고유저항의 변화에 따른 변화량은 매우 줄어들게 된다. 고가의 경우에는 연속접지가 아니므로 교각을 통해 주기적으로 접지되는 효과를 고려해 주어야 한다. 또한, 교각의 높이에 따라 차폐계수도 달라지나, 실제 계산에서는 교각의 높이가 서로 달라 적용에 어려움이 있다. 단, 피유도선이 근접할 경우에는 이를 고려하는 것이 바람직하다. 결론적으로 터널 및 고가 구조물의 차폐계수는 구조물의 종행 철근의 개수와 위치에 주로 영향을 받는데, 철근의 배치가 비교적 균등하다고 할 때 차폐계수는 종행 철근의 개수에 지수적으로 반비례하므로 이 영향을 계수에 적용하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 연구는 (주)동남TDS의 지원비와 2015년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호 520150460)에 의하여 연구하였음.

References

[1] ITU-T, "Directives, concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines", Volume II, III, 1999.

[2] Kazuo Miyashita, "Discussion of induction problem", *Railway communication association of Japan*, 1981.

[3] Electromagnetic Induction Policy Special Committee, Japan, "Current Trend and Assignment of the Electromagnetic Induction", *IEEE*, 1979.

[4] Andrea Mariscotti, "Induced Voltage Calculation in Electric Traction Systems: Simplified Methods, Screening Factors, and Accuracy", *IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 201-209, Mar.

2011.

[5] G. Lucca, "Per unit length parameters of a multi-conductor line with earth return inside a tunnel", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 42, No. 1, pp. 6-15, Feb. 2000.

[6] Technical criteria for the method of calculating the specific electric power induction voltage, asterisk 6, National Radio Research Agency notice 2014~102.

[7] Railway Facility Standard KR E-04050 'Earthing', Korea Rail Network Authority, August 2016.

[8] KAIST, Dong-Nam TDS, 'Telecommunication Induced Voltage Prediction Calculation Report', 1993.

저 자 소 개



최 경 (Kyung Choi)

1981년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사), 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1989년~현재 강원대학교 전자공학과 교수



이 향 범 (Hyang-Beom Lee)

1989년 서울대학교 전기공학과 졸업(학사), 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1998년~현재 송실대학교 전기공학과 교수



김 형 석 (Hyeong-Suck Kim)

1985년 서울대학교 전기공학과 (학사), 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사), 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1990년~2015년 순천향대학교, 중앙대학교 교수, 현 (주)대영유비텍 고문



김 학 철 (Hak-Chul Kim)

2013년 중앙대학교 정보통신대학원 (석사), 1976년~1980년 체신부, 1980년~ 1988년 한아통신, 1990년~2004년 동남통신 부사장, 현재 (주)동남 이엔에스 대표