

수직 배열된 원전 케이블 트레이 내부 누설전류에 의한 전자파 장해 분석

Analysis of Electromagnetic Interference Caused by Leaky Line-Current in Vertically Placed Cable Trays in Nuclear Power Plants

주 재 율

Jaeyul Choo

요 약

본 논문에서는 수직으로 배열된 케이블 트레이 내부에 발생한 전자파 장해원에 의한 전자파 영향성을 모드정합법으로 분석하였다. 모드정합 해석을 위해서 케이블 트레이의 구조와 설치 환경 등을 모델링하였고, 헬름홀츠 방정식과 중첩의 원리를 적용하여 해석공간에 대한 전계, 자계, 전자파 장해원을 표현하였다. 세분화된 해석공간 경계면에서 전자계 연속 조건을 적용하여 전자계 표현식에 포함된 모드계수를 계산하였다. 도출된 모드계수를 통해서 특정 위치의 전계에 대한 수렴성을 확인하였고, 모드정합법과 상용 시뮬레이션의 해석 결과가 유사함을 확인하였다. 케이블 트레이들 내부에 다양한 조합으로 전자파 장해원이 존재할 경우와 케이블 트레이와 실내 벽과의 거리가 변화할 경우에 대해서 모드정합 해석을 활용하여 전자파 영향성을 분석하였다. 본 논문에서 도출한 전자파 영향성 분석결과는 케이블 트레이를 원전 내부에 설치할 경우, 전자파적합성 확보하기 위한 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

Abstract

An analytical interpretation of the electromagnetic interference between open cable trays vertically placed in a nuclear power plant is presented using a mode-matching method. The cable trays were modeled by considering the various structural parameters. Subsequently, the electric and magnetic fields and the electromagnetic sources were derived using the Helmholtz equation in conjunction with the superposition principle. After dividing the overall analyzed space into multiple sub-regions, the continuities of the electric and magnetic fields were applied to the interfaces between the sub-regions to compute the modal coefficients included in the electric field expressions. The proposed mode-matching method was verified by checking the convergence of the electric field at certain interesting points and comparing the electric field derived from the mode-matching method with that calculated from a commercial electromagnetic simulator. Furthermore, the electromagnetic interference caused by the type and number of electromagnetic sources, and the distances between the later walls and cable trays were investigated. The results of this study provide valuable information to alleviate the electromagnetic interference between the open cable trays in a nuclear power plant.

Key words: Cable Tray, Electromagnetic Interference, Mode-Matching Method, Nuclear Power Plant

「이 논문은 안동대학교 기본연구지원사업에 의하여 연구되었음.」

안동대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Andong National University)

· Manuscript received November 24, 2021 ; Revised December 9, 2021 ; Accepted December 17, 2021. (ID No. 20211124-106)

· Corresponding Author: Jaeyul Choo (e-mail: jychoo@anu.ac.kr)

I. 서론

최근 디지털 기술의 발달로 인하여 원자력발전소(이하, 원전)에 다양한 디지털 계측·제어 및 전력 설비들이 도입되고 있다. 특히 최근에는 원전 내 안전기능¹⁾을 수행하는 안전관련 설비에도 다양한 디지털 설비들이 도입되고 있다. 그러나 원전 내 디지털 설비의 도입과 더불어 전자파 장애로 인한 원전 설비의 오작동 문제가 주목받고 있다¹⁾. 실제로 미국의 여러 원전에서 전자파 장애로 인한 오작동 문제가 발생하였다고 보고되고 있다¹⁾. 특히, 원전 안전기능을 수행하는 여러 원전 보호계통에 동일한 디지털 설비가 적용될 경우, 전자파 장애 문제는 원전 안전운전을 심각하게 위협하는 공통원인 고장을 발생시킬 수 있다^{1)~3)}.

앞서 설명한 원전 내 전자파 장애문제를 대비하기 위해서, 국내 원전 규제기관(한국원자력안전위원회)은 안전관련 디지털 설비에 대한 전자파적합성(electromagnetic compatibility(EMC)) 검증을 법적으로 요구하고 있다. 또한, 한국원자력안전위원회 산하 기술기관인 한국원자력안전기술원은 원전 규제지침 KINS/RG-N03.09를 발행하여, 원전 분야의 EMC 검증에 대한 시험방법 및 허용기준을 상세히 제공하고 있다⁴⁾. 그러나 해당 규제지침은 원전 내 전자파환경을 고려한 전자파 장애문제는 상세히 다루고 있지 않고, 원전에 적용되는 디지털 설비에 대한 EMC 검증을 주로 다루고 있다. 따라서 원전 내 전자파환경 건전성을 저해할 수 있는 다양한 전자파 장애원에 대해서 심도있는 검토와 연구가 필요하다⁵⁾.

원전 내 포설된 전력용 케이블이 손상될 경우, 손상 케이블의 누설전류는 전자파 장애원이 될 수 있다. 특히, 디지털 설비의 신호 케이블이 열악한 차폐성능을 갖거나 누설전류에 가깝게 위치한다면, 누설전류에 의한 전자파 장애는 원전 디지털 설비의 기능에 큰 위협이 될 수 있다. 그러나 원전용 케이블은 케이블 트레이 내부에 포설되며, 케이블 트레이 간의 규정된 이격거리가 확보되기 때문에 어느 정도 전자기적 차폐 효과를 기대할 수 있다⁶⁾. 다만, 케이블 트레이는 재질과 형상이 다양하고, 케이블 트레이

간의 이격거리도 전자파 장애를 고려하여 규정된 것이 아니므로, 정확한 전자파 차폐효과를 확인하기 위해서는 케이블 트레이에 대한 전자기적 해석이 필요하다.

본 논문에서는 규정된 케이블 트레이의 이격거리에 대한 전자기적 유효성을 확인하기 위해서, 수직으로 적층된 개방형 트레이에 대한 전자기적 해석을 수행하였다. 전자파 장애원을 모의하기 위해서 케이블 트레이 내부의 포설 케이블에 누설전류가 발생했다고 가정하였으며, 수직 방향으로 배열된 케이블 트레이에 해당 누설전류가 미치는 전자기적 영향을 모드정합법으로 분석하였다^{7)~9)}.

II. 모드정합 모델링 및 수식표현

그림 1은 사방이 벽으로 둘러싸인 실내 공간에 수직으로 배열된 N개의 케이블 트레이를 보여준다. 그림 1에서

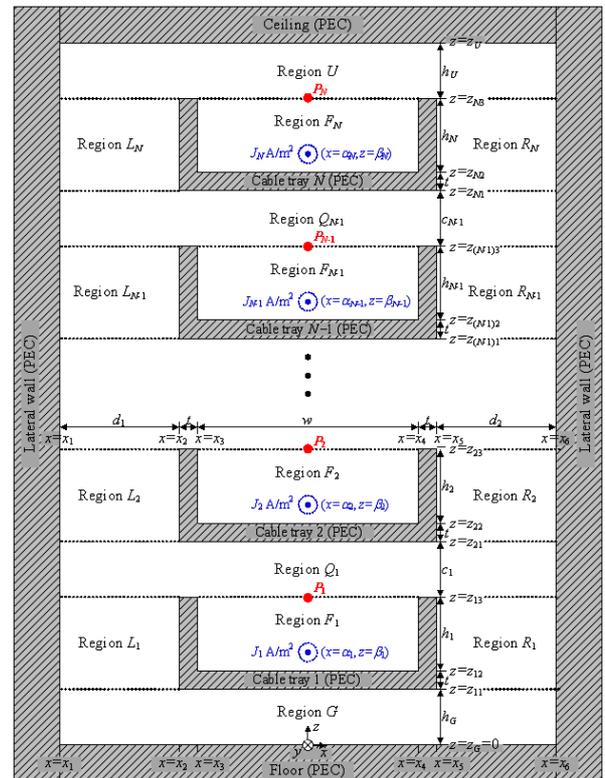


그림 1. 수직으로 적층된 케이블 트레이 구조
Fig. 1. Structure of vertically placed cable trays.

1) 원전 설계기준사고(design basis accident)에 대비하여 원전을 안전한 상태로 유지하기 위한 기능 (예, 제어봉 낙하).

해석공간은 맨 위의 케이블 트레이와 천장 사이의 영역 (Region U), 맨 아래 케이블 트레이와 바닥 사이의 영역 (Region G), n번째 케이블 트레이와 측면 벽 사이의 영역 (Region L_n 및 Region R_n), n번째와 n+1번째 케이블 트레이 사이 영역 (Region Q_n), n번째 케이블 트레이 내부 영역 (Region F_n)으로 구성된다. 케이블 트레이 내부에 발생하는 전자파 장해원을 표현하기 위해서, n번째 케이블 트레이 내부에 J_n A/m² 크기를 갖는 누설전류가 흐른다고 가정하였다. 또한, 그림 1의 케이블 트레이, 누설전류, 실내 벽은 y축 방향으로 무한한 길이를 갖는다고 가정하였다.

각 영역에 대한 전자계 표현식은 헬름홀츠 방정식으로 부터 유도하였으며, 중첩의 원리를 이용하여 각 케이블 트레이 내부의 누설전류를 표현하였다^{[8],[9]}. 식 (1)~식 (6)은 내부공간(Regions G, L_n, F_n, R_n, Q_n, U)에 대해서 도출한 급수형태의 전개 표현식이다. 또한, 식 (1)~식(6)에 포함된 A_g, A_{l_n}, B_{l_n}, A_{f_n}, B_{f_n}, A_{r_n}, B_{r_n}, A_{q_n}, B_{q_n}, A_u는 각 모드에 대한 모드계수이며, 이에 대한 값을 도출한 후 식 (1)~식 (6)에 대입하면 각 영역에 대한 전개값을 정확히 계산할 수 있다.

$$E_y^G = i\omega \sum_{g=1}^{\infty} A_g \sin \gamma_g (x - x_1) \sin \xi_g (z - z_G) \quad (1)$$

$$E_y^{L_n} = i\omega \sum_{l_n=1}^{\infty} \sin \gamma_{l_n} (x - x_1) (A_{l_n} \sin \xi_{l_n} z + B_{l_n} \cos \xi_{l_n} z) \quad (2)$$

$$E_y^{F_n} = \begin{cases} \text{when } \beta_n < z \leq z_{n3}, \\ i\omega \sum_{f_n=1}^{\infty} \left(A_{f_n} \sin \gamma_{f_n} (x - x_3) \sin \xi_{f_n} (z - z_{n2}) \right. \\ \quad \left. + J_n \chi_{f_n} (\alpha_n, x) v_{f_n} (\beta_n, z) \right) \\ \text{when } z_{n2} \leq z < \beta_n, \\ i\omega \sum_{f_n=1}^{\infty} \left(A_{f_n} \sin \gamma_{f_n} (x - x_3) \sin \xi_{f_n} (z - z_{n2}) \right. \\ \quad \left. + J_n \chi_{f_n} (\alpha_n, x) v_{f_n} (z, \beta_n) \right) \end{cases} \quad (3)$$

$$E_y^{R_n} = i\omega \sum_{r_n=1}^{\infty} \sin \gamma_{r_n} (x - x_5) (A_{r_n} \sin \xi_{r_n} z + B_{r_n} \cos \xi_{r_n} z) \quad (4)$$

$$E_y^{Q_n} = i\omega \sum_{q_n=1}^{\infty} \sin \gamma_{q_n} (x - x_1) (A_{q_n} \sin \xi_{q_n} z + B_{q_n} \cos \xi_{q_n} z) \quad (5)$$

$$E_y^U = i\omega \sum_{u=1}^{\infty} A_u \sin \gamma_u (x - x_1) \sin \xi_u (z - z_U) \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \chi_{f_n}(x', x) = \sin \gamma_{f_n} (x - x_3) \sin \gamma_{f_n} (x' - x_3),$$

$$V_{f_n}(z', z) = \frac{-2\mu_0}{\omega \zeta_{f_n} \sin \zeta_{f_n} h_n} \sin \zeta_{f_n} (z - z_{n3}) \sin \zeta_{f_n} (z - z_{n2})$$

이며, 식 (1)~식 (6)에 포함된 각 A_g, A_{l_n}, B_{l_n}, A_{f_n}, B_{f_n}, A_{r_n}, B_{r_n}, A_{q_n}, B_{q_n}, A_u는 각 영역의 모드계수이며, $r_g = g\pi / \sqrt{x_6 - x_1}$, $r_{l_n} = l_n\pi / \sqrt{x_2 - x_1}$, $r_{f_n} = f_n\pi / \sqrt{x_4 - x_3}$, $r_{r_n} = r_n\pi / \sqrt{x_6 - x_5}$, $r_{q_n} = q_n\pi / \sqrt{x_6 - x_1}$, $r_u = u\pi / \sqrt{x_6 - x_1}$ 이다.

또한, 각 영역에서의 자계(H_x)는 식 (1)~식 (6)에 (i/ω μ) · (dE_y/dz)를 적용하여 유도할 수 있다.

식 (1)~식 (6)에 포함된 모드계수 값을 도출하기 위해서 세부영역들 경계면에서 전자계 연속조건(전계 E_y 성분과 자계 H_x 성분의 연속조건)을 적용하였다. 또한, 세부영역의 총 개수는 설정한 케이블 트레이 개수(N)에 따라 달라지므로, 여기서는 반복적인 수식표현은 생략하고 일부 중요한 경계조건에 대해서만 다루었다. 대표적으로 경계면 z=z₁₁에서의 경계조건은 식 (7)~식 (9)으로, 경계면 z=z_{n3}(n=1, 2, ..., N-1)에서 경계조건은 식 (10)~식 (13)으로 표현된다.

$$E_y^G \Big|_{z=z_{11}} = \begin{cases} E_y^{L_1} \Big|_{z=z_{11}}, & x_1 \leq x < x_2 \\ 0 & x_2 \leq x < x_5 \\ E_y^{R_1} \Big|_{z=z_{11}}, & x_5 \leq x < x_6 \end{cases} \quad (7)$$

$$H_x^G \Big|_{z=z_{11}} = H_x^{L_1} \Big|_{z=z_{11}}, \quad x_1 < x < x_2 \quad (8)$$

$$H_x^G \Big|_{z=z_{11}} = H_x^{R_1} \Big|_{z=z_{11}}, \quad x_5 < x < x_6 \quad (9)$$

$$E_y^{Q_n} \Big|_{z=z_{n3}} = \begin{cases} E_y^{L_n} \Big|_{z=z_{n3}}, & x_1 \leq x < x_2 \\ 0 & x_2 \leq x < x_3 \\ E_y^{F_n} \Big|_{z=z_{n3}}, & x_3 \leq x < x_4 \\ 0 & x_4 \leq x < x_5 \\ E_y^{R_n} \Big|_{z=z_{n3}}, & x_5 \leq x < x_6 \end{cases} \quad (10)$$

$$H_x^{L_n} \Big|_{z=z_{n3}} = H_x^{Q_n} \Big|_{z=z_{n3}}, \quad x_1 < x < x_2 \quad (11)$$

$$H_x^{F_n} \Big|_{z=z_{n3}} = H_x^{Q_n} \Big|_{z=z_{n3}}, \quad x_3 < x < x_4 \quad (12)$$

$$H_x^{R_n} \Big|_{z=z_{n3}} = H_x^{Q_n} \Big|_{z=z_{n3}}, \quad x_5 < x < x_6 \quad (13)$$

다른 경계면에서의 전계와 자계의 연속조건을 식 (7)~식 (13)과 유사하게 유도한 후 정리하면, 모드계수의 개수만큼 연립방정식을 유도할 수 있다^{[8],[9]}.

III. 모드정합 해석결과

전자파해석에 있어 모드정합법의 장점은 무한대의 모드 합으로 표현된 각 영역의 전자계를 수렴성에 근거하여 제한된 모드의 합으로 표현 가능하며, 이를 통해 높은 계산 효율성을 확보할 수 있다는 것이다. 따라서 모드정합 해석결과에 대한 수렴성 확인은 다른 후속 연구결과를 도출하기에 앞서서 사전 검증용으로 선행되어야 한다. 본 연구에서는 모드정합 해석결과에 대한 수렴성을 특정점 $P_n(x_o, z_o)$ 에서 도출한 전계의 상대 오차율(η_n)로 확인하였으며, 세부영역 n 에서의 상대 오차율은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\eta_n(x_o, z_o) = \left| \frac{E_y^n(x_o, z_o) \Big|_{M=\infty} - E_y^n(x_o, z_o) \Big|_{M=K}}{E_y^n(x_n, z_n) \Big|_{M=\infty}} \right| \times 100 \quad (14)$$

여기서 x_o 와 z_o 는 세부영역 n 에 존재하는 특정점의 x 축과 y 축 좌표값이며, $K=1, 2, 3, \dots$ 이다.

또한, 이러한 수렴성에 근거하여 계산한 케이블 트레이의 전계분포를 상용 전자파해석 시뮬레이터로 도출한 전계분포와 비교하였다. 그림 2와 그림 3은 3개의 수직 배열 케이블 트레이 중 맨 아래와 중간에 위치한 케이블 트레이 내부에 각각 0.001 A/m^2 의 누설전류가 존재할 경우 ($J_1=J_2=0.001 \text{ A/m}^2$), 7개 위치($P_1 \sim P_7$)의 상대 오차율과 전계분포를 보여준다.

그림 2에서 보는 것과 같이, 7개 특정점에서 모드정합법으로 계산한 상대 오차율은 약 0%에 가까운 값으로 수렴하였으며, 이는 각 영역의 전계를 무한급수 형태(무한개의 모드)가 아닌 유한급수 형태(유한개의 모드)로 나타내어도 계산의 정확도가 보장되는 것을 의미한다. 따라

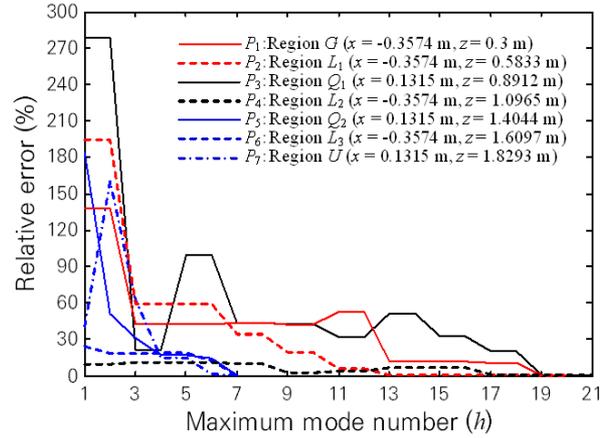


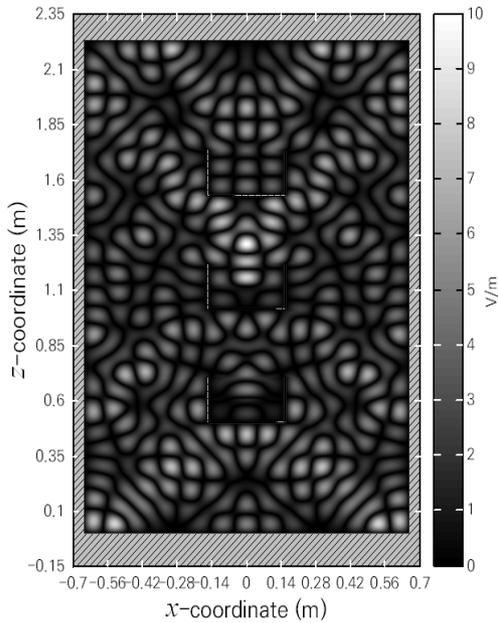
그림 2. $P_1 \sim P_7$ 관찰점에서의 전계 상대 오차율

Fig. 2. Relative error of electric field at the observation points $P_1 \sim P_7$ ($d_1=d_2=h_G=h_U=0.5 \text{ m}$, $t=0.005 \text{ m}$, $w=0.3048 \text{ m}$ (=12 inch), $h_1=h_2=h_3=0.2032 \text{ m}$ (=8 inch), $c_1=c_2=0.305 \text{ m}$, $J_1=J_2=0.001 \text{ A/m}^2$, $J_3=0 \text{ A/m}^2$, $a_1=a_2=0 \text{ m}$, $\beta_1=0.6066 \text{ m}$, $\beta_2=1.1198 \text{ m}$).

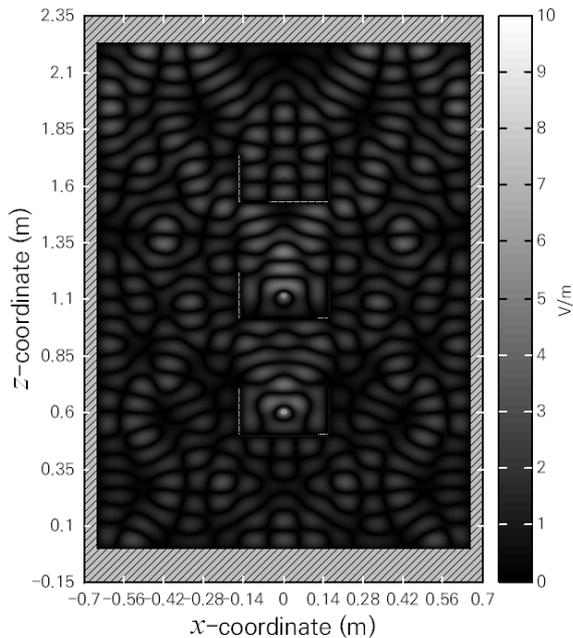
서 계산의 정확도가 보장되는 유한개 모드를 이용하여 모드정합 해석을 수행할 경우, 상대적으로 짧은 시간에 비교적 정확한 계산 결과를 얻을 수 있다. 또한, 각 영역에서 고려할 수 있는 모드 개수는 각 영역의 크기에 의해서 결정되며, 이에 대한 상세한 분석내용은 참고문헌에 상세히 제시되어 있다^[9].

추가적인 검증을 위해서, 그림 2에서 확인한 모델을 상용 시뮬레이션 이용하여 해석하였으며, 이를 모드정합법 해석 결과와 함께 그림 3에 제시하였다. 그림 3(a)와 그림 3(b)의 비교를 통해서 모드정합법 해석 결과가 상용 시뮬레이터의 해석 결과와 유사하다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 모드정합법을 이용하여 수직으로 배열된 케이블 트레이가 있는 실내 전파환경을 해석할 경우, 상용 시뮬레이터와 유사한 수준의 해석 정확도로 전파환경을 예측할 수 있음을 확인하였다.

검증된 모드정합법을 활용하여 3개의 케이블 트레이 내부에 발생하는 전자파 장해원이 다양한 조합으로 존재할 경우를 전자기적으로 분석하였다. 각 케이블 트레이 내부의 전자파 장해원은 0.001 A/m^2 크기를 가지며, 케이블 트레이 내부 중앙(Region F_n 중앙)에 존재할 수 있다고 가정하였다. 또한, 케이블 트레이 1~3 내부의 전자파 장



(a) 모드정합 해석결과
(a) Mode-matching result



(b) 상용 시뮬레이터 해석결과
(b) Result of a commercial EM simulator

그림 3. 수직으로 3개의 케이블 트레이가 배치되었을 경우의 전계분포

Fig. 3. Electric-field distribution of indoor environment where three cable trays are vertically placed.

해원은 표 1과 같은 6가지 경우가 가능하다고 가정하였다. 표 1에 제시된 6가지 경우를 적절하게 조합하고 비교하면, 개별 누설전류에 대한 전자파 영향성을 평가할 수 있다. 예를 들어 case 2와 4를 비교하거나, case 3과 5를 비교하면 케이블 트레이 1에서 발생한 누설전류에 의한 전자기적 영향을 평가할 수 있다. 유사하게 표 1의 case 1과 4를 비교하거나, case 3과 6을 비교하면 케이블 트레이 2에 발생한 누설전류에 의한 전자기적 영향을 확인할 수 있으며, case 1과 5를 비교하거나, case 2과 6을 비교하면 케이블 트레이 3에 발생한 누설전류에 의한 전자기적 영향을 확인할 수 있다

그림 4는 3개의 케이블 트레이 중 1개의 케이블 트레이 내부 중앙에 전자파 장해원(누설전류)이 존재할 경우, 각 케이블 트레이 개구면 중앙점($P_1 \sim P_3$)에서 계산한 전계 세기를 보여준다. 그림 4(a)~그림 4(c)는 각각 표 1의 case 1, 2, 3에 대한 조사 결과이며, 이는 단독 누설전류로부터 발생한 전파가 수직으로 적층된 케이블 트레이에 미치는 전자기적 영향을 의미한다. 즉, 조사된 케이블 트레이 개구면 중앙점($P_1 \sim P_3$)의 전계 세기가 크다는 것은 케이블 트레이 형상, 이격거리, 실내구조 등에 의해 산란된 전파가 케이블 트레이 내부에 전자기적으로 큰 영향을 미친다는 것을 의미한다.

그림 4를 분석한 결과, 주어진 환경조건(케이블 트레이 형상, 이격거리, 실내구조 등)에서 케이블 트레이 개구면 중앙점 $P_1 \sim P_3$ 의 전계 세기는 전체적으로 주파수가 증가함에 따라 다소 상승하는 경향을 보였다. 또한, 표 1의 6가지 경우에 대해서 조사된 전계 세기를 비교 검토한 결과, 케이블 트레이 1, 2, 3의 누설전류는 각각 약 3~5 GHz 대역, 약 1.5~2 GHz 대역, 약 3.25~3.75 GHz 대역

표 1. 3개 케이블 트레이 내부 전자파 장해원 조합

Table 1. Cases with respect to the combination of EMI sources.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Cable tray 1	○	×	×	○	○	×
Cable tray 2	×	○	×	○	×	○
Cable tray 3	×	×	○	×	○	○

○: 전자파 장해원이 존재, ×: 전자파 장해원이 존재하지 않음.

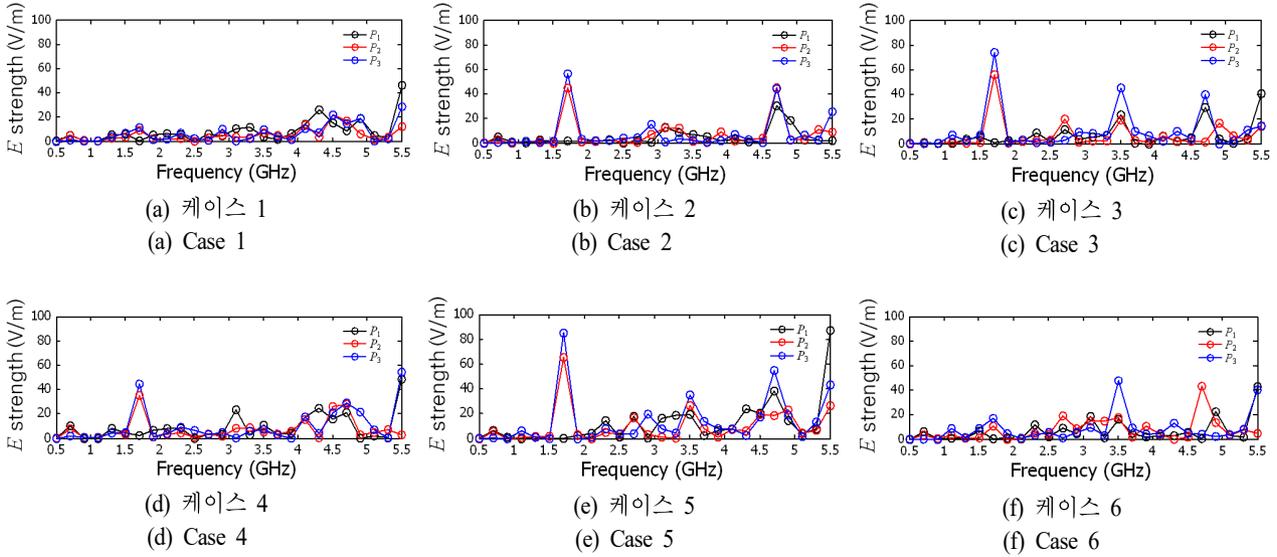


그림 4. 다양한 조합의 전자파 장애원이 존재할 경우, 주파수에 따른 각 케이블 트레이 개구면 중앙($P_1 \sim P_3$)의 전계 세기
 Fig. 4. Electric-field strength at the observation points $P_1 \sim P_3$ for the cases 1~6 in Table I ($d_1=d_2=h_c=h_v=0.5$ m, $t=0.005$ m, $w=0.3048$ m (= 12 inch), $h_1=h_2=h_3=0.061$ m (= 2.4 inch), $c_1=c_2=0.76$ m, $J_1=J_2=0.001$ A/m², $J_3=0$ A/m², $a_1=a_2=a_3=0$ m, $\beta_1=0.5355$ m, $\beta_2=1.3614$ m, $\beta_3=2.1874$ m).

에서 관찰점 $P_1 \sim P_3$ 의 전계를 강하게 하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 해당 주파수 대역에서 케이블 트레이 내부에 포설된 케이블들을 전자기적으로 보호하기 위한 차폐 대책이 필요하다는 것을 의미한다.

그림 5는 표 1의 case 1~3과 같이 전자파 장애원이 존재할 경우, 3개의 케이블 트레이와 양 측면 벽과의 거리 비(d_2/d_1)가 변화됨에 따른 관찰점 $P_1 \sim P_3$ 의 2 GHz 전계 세기를 보여준다. 그림 5의 결과를 검토한 결과, 케이블 트레이 1~3에 각각 누설전류가 단독으로 발생하였을 때,

케이블 트레이와 양 측면의 비(d_2/d_1)가 1.75~2.15, 3.75~4.75, 6.5~6.75인 경우에 $P_1 \sim P_3$ 의 전계 세기가 높아짐을 알 수 있었다. 따라서 분석된 환경조건에서 EMC 건전성을 확보하기 위해서는 케이블 트레이와 양 측면 벽과의 거리 비(d_2/d_1)가 1.75~2.15, 3.75~4.75, 6.5~6.75가 되지 않도록 해야 한다는 것을 알 수 있다.

추가적으로 그림 5의 상세분석을 위해서, 케이블 트레이와 양 측면의 비가 2인 경우($d_2/d_1=2$)에 대해서 전계분포를 조사하였으며, 이를 그림 6으로 나타내었다. 그림 6

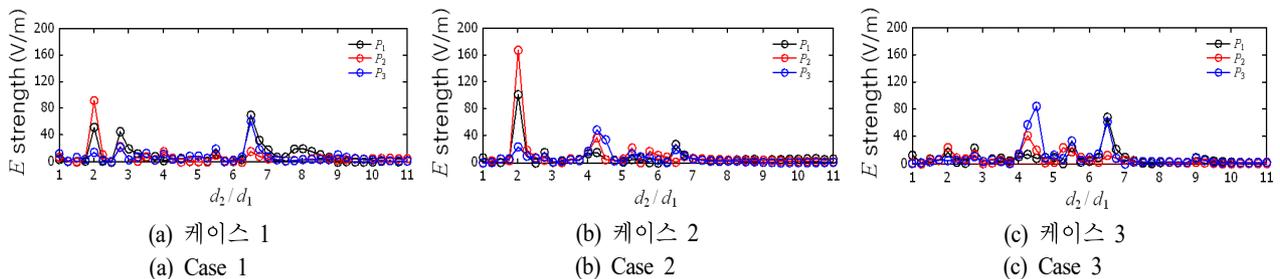


그림 5. 1개의 전자파 장애원이 존재할 경우, d_2/d_1 에 따른 각 케이블 트레이 개구면 중앙($P_1 \sim P_3$)의 전계 세기
 Fig. 5. Electric-field strength at the observation points $P_1 \sim P_3$ corresponding to d_2/d_1 where there exists a leaky line-current in single cable tray ($d_1+d_2=1$ m, $h_c=h_v=0.5$ m, $t=0.005$ m, $w=0.3048$ m (= 12 inch), $h_1=h_2=h_3=0.061$ m (= 2.4 inch), $c_1=c_2=0.76$ m, $a_1=a_2=a_3=0$ m, $\beta_1=0.5355$ m, $\beta_2=1.3614$ m, $\beta_3=2.1874$ m).

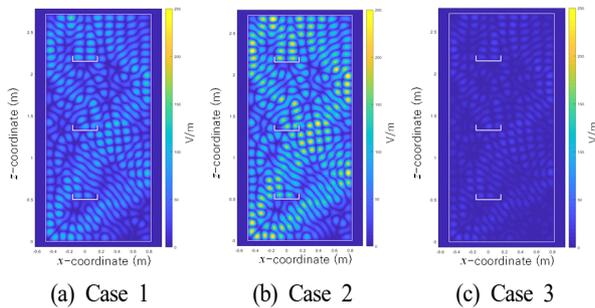


그림 6. 1개의 전자파 장애원이 존재하고 d_2/d_1 가 2일 경우의 전계분포

Fig. 6. Electric-field distribution in condition of $d_2/d_1=2$ (Structural parameters are same to those of Fig. 5).

과 같이 전계분포의 형상은 케이블 트레이 내부 전자파 장애원(누설전류) 조합과 상관없이 서로 유사하였으나, 형성되는 전계분포의 세기가 케이블 트레이 내부 전자파 장애원에 따라 달라진다는 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 원전 내부에 수직으로 배열된 케이블 트레이로부터 발생할 수 있는 전자파 장애 문제를 전자기적 해석을 통해 분석하였다. 설정된 환경조건과 전자파 장애 조건에 따른 엄밀한 전자파 해석결과를 도출하기 위해서 모드정합법을 수치해석 기법으로 활용하였다. 전자파 장애원은 케이블 트레이 내부에 흐르는 누설전류로 설정하였고, 실내 환경조건을 모의하기 위해서 천정, 바닥, 양 측면은 완전도체인 벽으로 설정하였다. 상정된 환경변수를 고려한 모드정합 해석을 위해서 헬름홀츠 방정식을 통해서 전계와 자계의 일반식을 도출하였으며, 중첩의 원리를 적용하여 전자파 장애원을 표현하였다. 전자계 표현식에 포함된 모드계수는 세분화 된 해석공간의 경계면에서 전계 및 자계의 연속조건을 적용하여 계산하였다.

모드정합 해석결과를 검증하기 위해서 특정 위치에서 모드 수가 증가함에 따라 전계값 오차율이 없어지는 것을 확인하였다. 그 외, 상용 EM 시뮬레이션을 통해서 모드정합 해석으로 도출된 전계분포가 상용 EM 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인하여 구현된 모드정합법을 검증하였다. 검증된 모드정합법을 이용하여 케이블 트레이 내

부의 누설전류 조합에 따른 전자파 영향성을 계산하였으며, 이를 통해 케이블 트레이를 전자기적으로 보호하기 위한 정보를 도출하였다. 추가적으로 케이블 트레이와 실내 측면 벽과의 거리비에 따른 전자파 영향성을 전계값으로 분석하였으며, 이를 통해서 전자파 영향을 저감하기 위한 케이블 트레이의 구조적 설치정보를 도출하였다.

References

- [1] H. M. Hashemian, *Nuclear Power Plant Instrumentation and Control*, London, inTech, 2011.
- [2] IAEA, *Protecting against Common Cause Failures in Digital I & C System of Nuclear Power Plant*, Vienna, IAEA, 2011.
- [3] H. K. Lee, S. B. Park, and Y. M. Kim, "Occurrence principle of common cause failure on digital I&C system and its case analysis," *KINS/RR-1924*, Korea Institute of Nuclear Safety, Oct. 2019.
- [4] *Guidelines for Evaluating Electromagnetic and Radio-Frequency Interference in Safety-Related Instrumentation and Control Systems*, KINS/RG-N03.09, Korea Institute of Nuclear Safety, Dec. 2019.
- [5] T. Y. Kim, J. H. Lee, "Power source modeling and experimental investigation of a spacecraft for EMC applications," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 1, pp. 78-85, Jan. 2021.
- [6] *IEEE Standard Criteria for Independence of Class 1E Equipment and Circuits*, IEEE Standard 384, 2008.
- [7] M. Bozorgi, "A mode-matching solution for TE-backscattering from an arbitrary 2D rectangular groove in a PEC," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 3, pp. 159-163, Jul. 2020.
- [8] H. J. Eom, *Wave Scattering Theory*, Berlin, Springer Verlag, 2001.
- [9] J. Choo, H. K. Lee, J. E. Park, H. Choo, and Y. H. Kim, "Analysis of electromagnetic interference between open cable trays," *IEEE Access*, vol. 8, no. pp. 72275-72286, Apr. 2020.

주 재 울 [국립안동대학교 전자공학과/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5804-858X>



2004년 2월: 홍익대학교 전기전자공학부
(공학사)

2006년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과
(공학석사)

2014년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학박사)

2006년 1월~2011년 2월: LS산전(현 LS

Electric) 주임연구원

2014년 2월~2020년 8월: 한국원자력안전기술원 선임연구원

2020년 9월~현재: 국립안동대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] 안테나 설계 및 EMC 등