THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2024 October; 35(10), 828～834.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2024.35.10.828
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

Battery Management System에 의한 자동차 누설 전자파 시뮬레이션

Simulation of Leakage Electromagnetic Radiation from Vehicle due to Battery Management System

이 영 우 · 고 일 석

Yeongwoo Lee · Il-suek Koh

요 약

많은 수의 누설 전자파 데이터를 획득하는 것이 제한되어, 시뮬레이션에 의한 생성이 필요하다. 본 연구에서는 차량에서 발생하는 비의도 누설 전자파 시간 영역 신호를 생성하기 위한 시뮬레이션 방법을 제안한다. 원 문제의 복잡도로 인해서 누설 전자파 방사 특성과 차체 효과를 고려한다. 부품단위의 알려진 누설 전자파 스펙트럼을 역 푸리에 변환을 사용하여 시간 영역 신호로 변환하고, 이때 부품을 다이폴과 같은 단순 안테나로 모델링하여 이의 주파수 영역에서의 왜곡 특성을 보상한다. 그 후 차체 내에 안테나를 위치시키고, 상업용 전자기장 해석 툴인 CST를 이용하여 최종 시간 영역 누설 전자파를 생성한다. 생성된 신호사이의 상관관계를 분석하여, 통계적으로 독립적인 데이터가 생성됨을 확인한다.

Abstract

Because existing information on leaked electromagnetic waves is not available, a model and simulation method are required to generate this information. Owing to the complexity of the problem, a feasible simulation method that considers the characteristics of the leaked electromagnetic radiation from devices inside a vehicle and vehicle body frame effects is proposed. The known leakage spectrum of the device was converted into a time-domain signal using inverse Fourier transform. Because the device was modeled as a dipole antenna, the distortion of the dipole must be compensated. The antenna was then placed inside the vehicle and the leakage wave was simulated using the commercial CAD tool CST. The correlation coefficient between the generated signals was computed, which showed that the dataset was statistically independent.

Key words : Unintended Electromagnetic Leakage, EMC/EMI, Machine Learning Dataset

Ⅰ. 서 론

최근 스텔스 표적을 검출하기 위해 표적이 운행 중 불가피하게 발생하는 특성을 검출하는 수동레이다[1]와 같이 비의도 누설 전자파에 탐지에 대한 연구 소요가 증가하고 있다. 이러한 탐지된 누설 전자파는 데이터의 개수가 충분히 확보되면 머신 러닝으로 분류하는 학습 데이터로도 사용될 수 있다. 그러나 군의 무기 체계에서 발생하는 누설 전자파 데이터를 직접적으로 얻는 것은 매우 어렵다. 따라서 논문이나 연구데이터를 비교적 쉽게 얻을

「이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-23-005).」

인하대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Inha University)

· Manuscript received May 20, 2024 ; Revised June 17, 2024 ; Accepted July 26, 2024. (ID No. 20240520-054)

· Corresponding Author: Il-Suek Koh (e-mail: ikoh@inha.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

수 있는 민수용 자동차로도 대체가 가능하다.

전장에서의 누설 전자파 신호는 실시간으로 탐지되기 때문에, 실제 환경에 부합하는 머신 러닝 데이터 셋은 시간 영역의 신호여야 한다. 그러나 민수용 자동차의 EMC /EMI 분야 데이터는 주파수 영역에서의 스펙트럼으로 분석되며, 이는 연구에 필요한 데이터 형식에 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서 자동차 부품의 알려진 누설 전자파 정보를 시뮬레이션의 입력신호로 사용하여, 자동차에서 발생하는 시간 영역 누설 전자파 시뮬레이션 방법을 제안한다.

본 논문에서는 여러 부품 중 배터리 관리 시스템(BMS, battery management system)에서 발생하는 누설 전자파 신호를 시간 영역 신호로 생성하는 방법을 Ⅱ절에서 제시하고, 이의 차체 효과까지 고려하는 시뮬레이션을 Ⅲ절에서 설명한다. Ⅳ절에서는 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터들의 독립성을 검증하여, 머신러닝 데이터의 적합성을 확인한다.

Ⅱ. BMS 발생 누설 전자파 시간 영역 신호 생성

차량에서 발생하는 시간 영역 누설 전자파는 많은 부품과 복잡한 차량 구조로 실제 시뮬레이션이 불가능하다. 그러므로, 여기서는 문제를 단순화하여, 부품에서 발생하는 누설 전자파의 특성이 방사되도록 소형 다이폴 안테나를 사용한다. 그리고 차체 모양에 의한 신호의 왜곡을 최대한 고려하여 다음과 같이 시뮬레이션한다. BMS 부품을 임의의 차체 CAD안에 놓고, 차체 외부에서 누설 전자파를 상용 전자기 해석 프로그램인 CST의 시간영역 유한 적분법(FIT)을 이용하여 계산한다. BMS 부품은 다이폴 안테나로 모델링하고, 이의 입력은 방사선 방출 테스트인 GB18655-2018 표준에 의해 측정된 BMS 부품의 근역장 방사 스펙트럼[2]을 사용하여 시간 영역 신호를 생성한다. 그 후 머신러닝 학습에 충분한 양의 데이터를 확보하기 위해, 다양한 누설 경우를 시뮬레이션한다.

BMS에서 발생하는 누설 전자파 스펙트럼은 그림 1의 원 모양 마커 선과 같이 알려져 있다. 스펙트럼에서는 크기(magnitude)와 주파수 정보만 주어져, 위상(phase) 정보는 알 수 없다. 그러므로, 모든 주파수에서 동일 시간 지연(time shift) 100 ns을 가정하고, 생성 신호 전체 길이는 300 ns으로 설정한다.

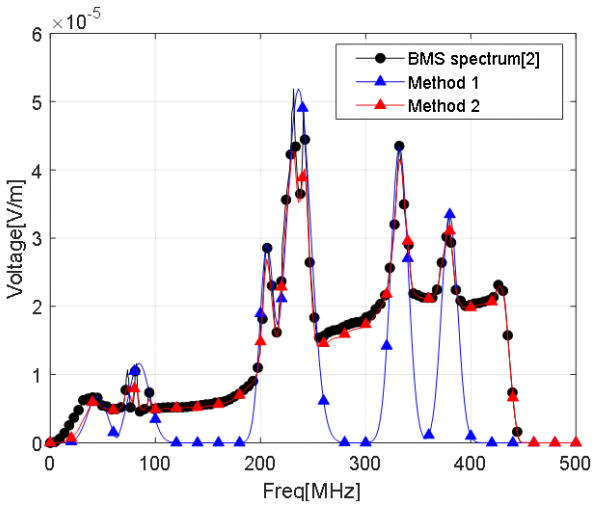

그림 1. BMS의 원 및 방법별 시뮬레이션 주파수 스펙트럼 비교

Fig. 1. Comparison of original spectrum of BMS and those calculated by two methods.

시간 영역 신호는 두 가지 방법으로 생성할 수 있다. 첫 번째는 스펙트럼에서 가장 큰 주파수 특징을 갖는 이 산 주파수 특성을 변조 가우스 신호(modulated gaussian signal)로 근사하는 방법이다. 두 번째는 전체 스펙트럼을 역 푸리에 변환(inverse Fourier transform)하는 방법이다. 첫 번째 방식은 시간 간격(time interval)이나 전체 시간 길이를 유동적으로 조절할 수 있고, 두 번째 방식은 입력 스펙트럼과 일치한 스펙트럼을 얻을 수 있다.

첫 번째 방식은 주어진 스펙트럼에서 상대적으로 큰 피크 주파수를 중심으로 즉, 그림 1의 파란색 선(method 1)같이 가우스 스펙트럼으로 근사화한다. 이때, 정확한 시간 영역 식은 식 (1)로 주어진다[3].

$$x(t)=\sum_{k=1}^{n}A_kC_kte^{-\left(\frac{1}{2}(BW_k^*\pi)^2\right)(t-t_d)^2}e^{-j2\pi f_kt} \tag{1}$$

여기서 f_k는 선택한 k번째 지점의 주파수, A_k는 k 번째 지점의 크기이다. 또, BW_k는 k 번째 지점의 대역폭, 그리고, t_d는 시간 지연(time delay)을 나타낸다. C_k는 다이폴 안테나 보상 계수로, 이는 뒤에 설명한다. 대역폭은

피크 지점에서 크기가 −3 dB 줄어드는 두 주파수의 간격으로 설정한다.

두 번째 방식은 먼저 시간 영역 신호로 변환할 주파수 범위를 결정한다. 본 연구에서는 소형 다이폴(short dipole)의 길이(L)를 60 mm로 설정하였다. 일반적으로, 소형 다이폴 안테나 동작의 크기는 $L < \lambda/10$로 주어지므로, 동작 파장(λ)은 600 mm 이상이다. 그러므로, 소형 다이폴 안테나의 유효 주파수는 500 MHz 이하이다. 따라서 알려진 BMS 스펙트럼에서 주파수가 500 MHz 이하의 데이터만 튜키 윈도우(Tukey window)를 사용하여 그림 1 같이 추출한다[4]. FIT 시뮬레이션에 필요한 시간 샘플링 간격은 매우 작아 나이퀴스트 샘플링 레이트(Nyquist sampling rate)보다 최소 10배 작은 시간 샘플링 간격으로 시간 영역 신호를 생성하였다.

시간 영역 신호는 소형 다이폴 안테나를 통해 방사되어, 방사 전기장의 세기는 주파수에 비례하여 커진다. 이를 보상하기 위해, 자유 공간에서 다이폴 방사 필드를 계산 후 이를 바탕으로 입력 스펙트럼 크기를 보상한다. 첫 번째 방식으로 피크 주파수에서 스펙트럼의 크기가 1인, 시간 영역 신호를 만들어 다이폴 안테나의 입력으로 사용한다. CST를 사용하여 1 m 떨어진 곳에서 다이폴 안테나의 방사 신호를 계산한다. C_k는 측정된 스펙트럼이 입력 스펙트럼과 같도록, 즉 수신된 스펙트럼 크기의 역수로 계산한다. 이는 표 1에 정리되어 있다. 예측했던 대로, 주파수가 낮을수록 더 큰 C_k를 얻는다. 이를 두 번째 방법에 적용하기 위해, 이산 주파수에서 얻은 C_k를 주파수 전 범위에서 보간하고, 이를 입력 스펙트럼에 곱한다. 그림 2는 1 m 거리에서 측정된 스펙트럼의 보정 전, 후 결과 비교이다. 보정 후 결과가 주어진 입력 스펙트럼과 같아, 다이폴에 의한 왜곡 효과가 제거됨을 알 수 있다. 그림 1은 두 방법으로 생성된 다이폴 효과가 보정된 신호의 스펙트럼 비교이다. 두 번째 신호 생성 방법이 주어진 BMS 스펙트럼을 왜곡 없이 정확히 생성함을 알 수 있다.

표 1. 다이폴 안테나 보상 계수
Table. 1. Dipole antenna compensation coefficient.

f (MHz)	40.94	59.92	87.72
C_k	1,938	925.926	431.034
f (MHz)	126	191.4	337.2
C_k	209.644	90.909	28.818
f (MHz)	372.3	450	
C_k	23.419	15.748	

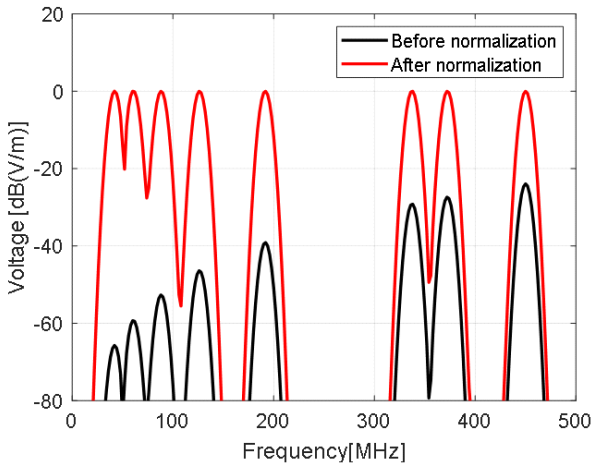

그림 2. 1 m 떨어진 지점에서 다이폴 안테나의 보상 전, 후 스펙트럼
Fig. 2. Compensated and uncompensated spectrum of the dipole antenna at 1 m away from the dipole.

Ⅲ. 차체 효과 시뮬레이션

차체를 고려하는 경우, BMS 부품의 정확한 위치나 다른 내부 구조물 등 실제 환경의 효과를 완벽하게 고려하는 데는 한계가 존재한다. 또한, 다이폴 안테나의 방향(orientation) 특성도 중요 파라미터 중 하나이다. 본 연구에서는 BMS 부품의 여러 예상 위치와 세 가지 다이폴 방향 등을 고려하여 누설 전자파 시간 영역 신호를 생성한다. 이러한 방법으로 많은 수의 신호를 생성할 수 있고, 이를 머신러닝 학습에 활용할 수 있다. 차량은 크기가 다른 세 종류, 즉 스포츠 유틸리티 자동차(SUV), 소형차, 트럭을 고려하고, 그림 3에서 형상을 확인할 수 있다. 표 2는 각 차량의 전장(length), 전폭(width), 전고(height)를 보여준다. 차체와 차체가 놓인 바닥 면은 완전 전기 도체(perfect electric conductor)로 가정한다.

차량 내 BMS 부품의 정확한 위치를 알 수 없어, 그림 4와 같이 8개의 잠재적 위치에 세 가지 방향으로 배열된

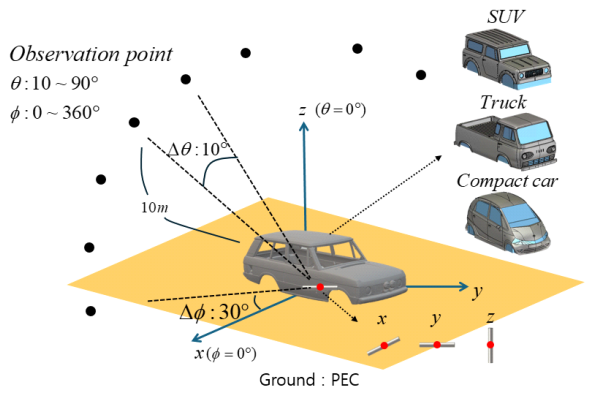

그림 3. 전기장 측정을 위한 관측점, 차량 모양 및 내부 다이폴 안테나 배치

Fig. 3. Position of observation points to measure electric field, three CAD shape and dipole orientation.

표 2. 차량 크기

Table 2. Vehicle dimensions.

	Compact	SUV	Truck
Length [m]	2.956	3.984	5.507
Width [m]	1.619	1.834	2.257
Height [m]	1.545	1.468	1.917

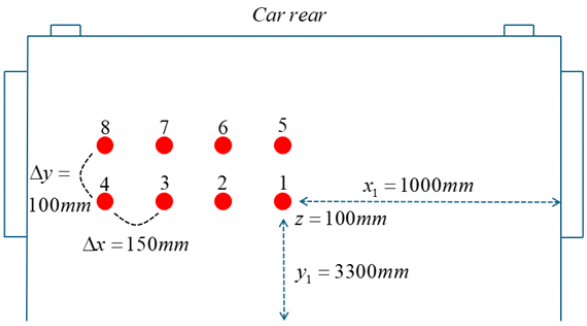

그림 4. SUV 차량 내의 BMS 예상 위치

Fig. 4. Estimated position of BMS inside SUV vehicle.

다이폴 안테나를 배치하고 시뮬레이션을 수행한다. 그림 3과 같이 차량 외부에서 누설 전자파를 측정하기 위한 EMC/EMI 실험 표준 위치(차량에서 10 m 떨어진 거리)에 측정점을 θ방향으로 10°, ϕ방향으로 30° 간격으로 배치한다[5]. 관측점은 $z \geq 0$인 반구위에 위치한다. 따라서, 차량 3종류, 부품의 잠재적 위치 8개, 다이폴 안테나 3방향, 관측점 108개로, 총 7,776개의 데이터를 획득할 수 있다.

실제 차량 내부는 다양한 구조물이 존재하나, 이를 시뮬레이션하는 것은 불가능하다. 구조물의 주된 효과 중 하나는 부품에서 발생하는 누설 전자파를 감쇠시키는 것이다. 만약, 차량 내부를 자유 공간으로 가정하는 경우, 그림 5 및 그림 6의 검정색 신호와 같이 지속적인 신호 진동이 관찰되고, 이는 차량 내부 구조에 의한 공진 효과로 판단된다. 이는 차체의 크기에 따라 달라지므로, 이 효과를 줄이는 것이 매우 중요하다.

차량 내부에서 전파되는 신호의 크기를 줄이기 위해, 차량 CAD 내부를 임의의 유전매질로 채웠다. 이때, 유전

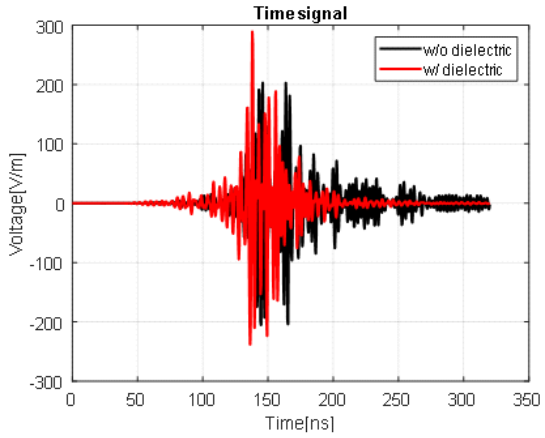

그림 5. 스포츠 유틸리티 자동차 시간 영역 누설 전자파

Fig. 5. Time domain leaked electromagnetic wave from SUV.

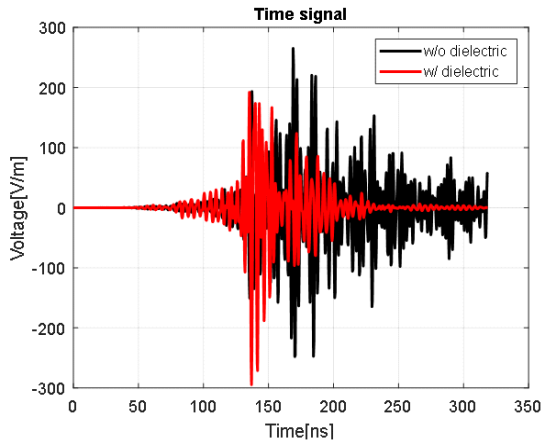

그림 6. 트럭 시간 영역 누설 전자파

Fig. 6. Time domain leaked electromagnetic wave from truck.

매질의 손실 부분, ϵ''을 조정하여, 유전매질의 감쇠 계수 $\alpha(Np/m)$를 조절하였다[6]. 식 (2)는 유전매질의 감쇠 계수이다. 여기서, $\mu=\mu_0$은 투자율이고, ϵ'과ϵ''은 각각 복소 유전율의 실수부, 허수부이다. ϵ'은 2.2로 가정한다.

$$\alpha=\frac{2\pi f}{c}\sqrt{\frac{\mu\epsilon'}{2}}\left(\sqrt{1+\left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2}-1\right)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

길이가 3.984 m인 스포츠 유틸리티 자동차 차량 끝에서 전자기파의 세기가 출력대비 −6 dB 감쇠율을 가져, 차체 프레임에 의한 반사가 줄어들도록 복소 유전율을 설정하였다. 주파수 400 MHz에서, 다이폴 안테나가 있는 위치에서 차량 끝까지의 감쇠 비율 $10\log_{10}(e^{-\alpha\times L})$이 −6 dB가 되는 ϵ''은 감쇠 길이 L이 최대 3.984 m일 때, 스포츠 유틸리티 자동차의 경우 ϵ''=0.123으로 계산된다. 비슷하게 다른 두 종류의 차량에도 ϵ''을 계산할 수 있다. 그림 5 및 그림 6은 각각 스포츠 유틸리티 자동차, 트럭의 누설 전자파 신호를 보여준다. 다이폴의 위치는 그림 4의 파라미터를 기준으로 스포츠 유틸리티 자동차는 z=120, x_1=1,000, y_1=3,300, 트럭은 z=120, x_1=1,160, y_1=4,080에 위치한다. 관측점 위치는 두 차량 모두 θ=60°, ϕ=90°이다. 유전체가 삽입된 경우, 신호크기가 시간에 따라 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

Ⅳ. 시간 영역 신호 상관계수 계산

관측점의 간격이 충분히 이격되어 관측된 신호들 사이의 상관도가 작은지를 확인하기 위해 생성된 신호들 사이의 상관계수(correlation coefficient), 식 (3)을 계산하였다[7].

$$\rho(X,Y)=\frac{E[(X-\mu_X)(Y-\mu_Y)]}{\sigma_X\sigma_Y} \tag{3}$$

여기서 $X=x_{ref}(t)$는 기준점 수신 안테나의 시간 영역 신호, $Y=x_n(t)$는 기준점외 수신용 안테나에서 측정된 시간 영역 신호이다. μ_X, σ_X는 변수X의 각각 평균과 표준편차이다. 그리고 $E[\bullet]$는 시간 평균이다.

그림 7는 ϕ가 동일하거나 180° 차이나는 관측점들을 선택하여, 기준 관측점(θ=90°, ϕ)에서 측정된 시간 영역

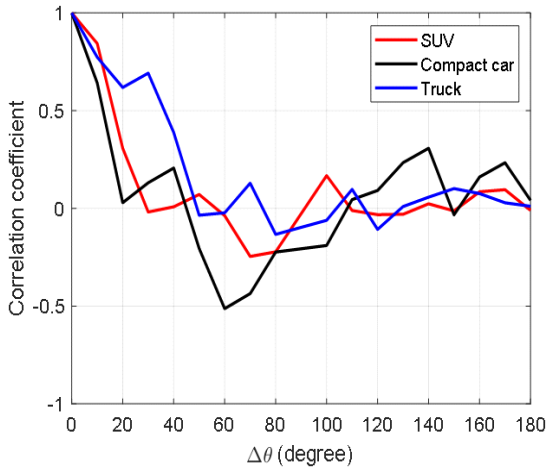

그림 7. 세 차량의 ϕ가 같거나 180° 차이나는 관측점 그룹의 누설 전자파 상관계수

Fig. 7. Correlation of leaked electromagnetic wave along observation point with identical ϕ or a ϕ difference of 180°.

신호와 다른 관측점에서 측정된 신호 간의 상관계수를 보여준다. ϕ가 동일하거나 180° 차이나는 수신용 안테나는 기준점을 포함하여 18개이며 ($n=1\ldots18$), θ가 다른 총 6개 관측 그룹이 있다. 하나의 관측 그룹에 대해, (4)를 계산하고 6개의 상관계수를 평균하여 그림 7에 표시하였다. x축은 기준점($n=1$)에서 간격이 10°씩 증가하는 $\Delta\theta=|\theta_{ref}-\theta_n|$이다. 상관계수의 크기는 기준점에서 $\Delta\theta=40°$ 이상부터 최대 0.38에서 최소 −0.51 사이의 값을 가진다.

그림 8은 θ가 동일한 관측점들 사이의 상관관계로 (θ, ϕ= 0°)를 기준점으로 선택하였다. θ가 동일한 수신용 안테나는 기준점을 포함하여 12개이고 ($n=1\ldots12$), 총 9개 그룹의 평균으로 상관계수를 계산하였다. x축은 기준점($n=1$)으로 하여 30° 차이나는 $\Delta\phi=|\phi_{ref}-\phi_n|$이다. 상관계수의 크기는 기준점에서 $\Delta\phi$=30°이상부터 최대 0.25에서 최소 −0.22 사이의 값을 가진다. 이는 기준점에서 멀어진 지점의 신호들은 무 또는 약한 상관관계를 가짐을 의미한다.

다음으로, 서로 다른 차량 2개의 교차상관계수(cross correlation)을 계산하여 차량 간 신호의 독립성을 확인한다. 식 (3)에서 $X=x_{Car1}(t)$, $Y=x_{Car2}(t)$으로 선택하

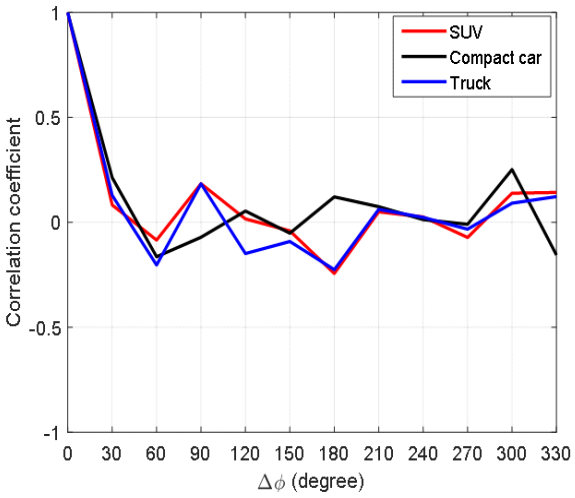

그림 8. 세 차량의 θ가 같은 관측점 그룹의 누설 전자파 상관계수

Fig. 8. Correlation of leaked electromagnetic wave along observation point with identical θ.

여 차종이 다르고 수신 안테나는 동일한 위치의 시간 영역 사이의 교차 상관 계수를 계산한다. 그림 9은 ϕ가 같은 관측점 그룹의 교차상관관계이며, 차량 간의 교차상관계수들의 평균값을 보여준다. 그림 10은 θ가 같은 그룹의 결과

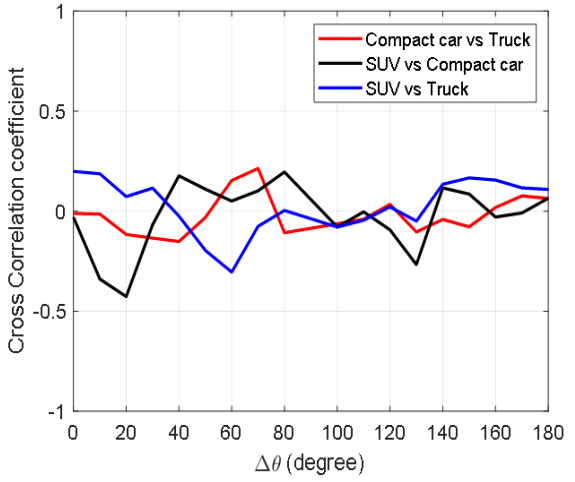

그림 9. 두 차량의 누설 전자파 교차 상관 계수: ϕ가 동일하거나 180° 차이나는 관측점 그룹

Fig. 9. Cross-correlation coefficient of leaked electromagnetic waves from two vehicles: observation points with identical ϕ or a ϕ difference of 180°.

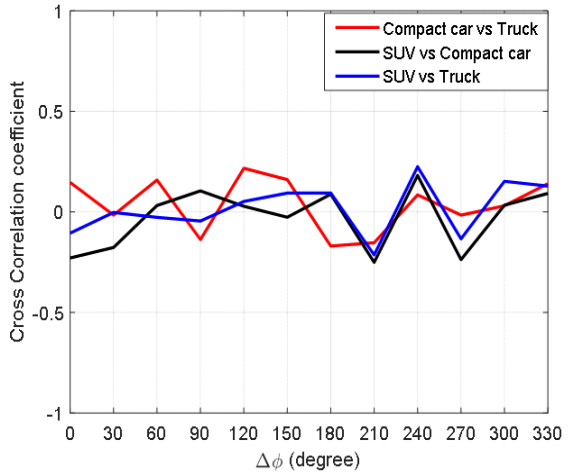

그림 10. 두 차량의 누설 전자파 교차 상관 계수: θ가 동일한 관측점 그룹

Fig. 10. Cross-correlation coefficient of leaked electromagnetic waves from two vehicles: observation points with identical θ.

를 보여준다. 두 경우 모두, 상관관계가 0.21에서 −0.43 사이 (그림 9), 그리고 0.21에서 −0.25 사이(그림 10)에 있어, 신호들이 무 또는 약한 상관성을 가짐을 알 수 있다.

Ⅴ. 결 론

부품 단위에서 발생하는 비의도 누설 전자파의 시간 영역 신호를 알려진 스펙트럼을 바탕으로 생성하였다. 이 때 부품의 형상을 정확히 고려하지 못해 다이폴 안테나로 모델링하고, 이의 신호 왜곡을 방지하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 알려진 스펙트럼과 같은 스펙트럼이 생성된다. 차량 내부 구조물 효과 중 감쇠 효과를 고려하기 위해, 유전매질로 차량내부를 채웠다. 유전체의 복소 유전율은 차 내부의 감쇠가 최대 −6 dB가 되도록 설정하였다.

제안된 방법으로 생성된 누설 전자파 신호의 상관관계를 분석하면, 같은 차량인 경우 관측점이 다르면 신호를 사이에서 약한 상관관계를 보인다. 그리고 차량의 종류가 다르면 같은 관측점에서도 약한 관계를 보인다. 그러므로, 제안된 방법으로 생성된 신호를 머신러닝 학습에 사용할 수 있다.

References

[1] N. J. Willis, *Bistatic Radar*, Raleigh, NC, SciTech, 2004.

[2] L. Zhai. *Electromagnetic Compatibility of Electric Vehicle: Key Technologies on New Energy Vehicles*, New York, NY, Springer, pp. 383-384, 2021.

[3] Wikipedia. "Fourier transform." Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform

[4] P. Bloomfield, *Fourier Analysis of Time Series: An Introduction*, 2nd ed. New York, NY, John Wiley & Sons, 2000.

[5] N. Samira, "Electromagnetic compatibility(EMC) test in an open area," M.S. thesis, Luleå University of Technology, Norrbotten, p. 50, 2023.

[6] W. H. Hayt, J. A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, New York, NY, McGraw Hill, pp. 319, 2018.

[7] R. E. Walpole, R. H. Myers, S. L. Myers, and K. Ye, *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Hoboken, NJ, Prentice Hall, p. 125, 2011.

이 영 우 [인하대학교/석사과정]

https://orcid.org/0009-0000-8479-7712

2023년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)

2023년 2월~현재: 인하대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] Electromagnetic Security Research

고 일 석 [인하대학교/교수]

http://orcid.org/0000-0003-0014-2466

1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1996년 4월: LG 전자연구원

2002년 8월: The University of Michigan at Ann Arbor 전기 및 전산과 (공학박사)

2004년 3월~2010년 8월: 인하대학교 정보통신대학원 교수

2010년 9월~현재: 인하대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] Theoretical Electromagnetics, Numerical Analysis, Wave Propagation through Complex Media