

디젤차 비의도 전자기 방출 스펙트럼의 통계적 분석 및 합성

Statistical Analysis and Synthesis of Unintended Electromagnetic Emission Spectra from Diesel Vehicles

박 준 모¹ · 고 일 석²

Jun-Mo Park¹ · Il-Suek Koh²

요 약

디젤 차량의 비의도 전자기 방출 신호 합성을 위해 EMC/EMI 측정 데이터를 스펙트럼 특성에 따라 3가지 유형으로 분류하고 통계적으로 분석하였다. 스펙트럼 변동의 확률밀도함수를 정규분포로 근사하는 가정을 분위수-분위수 플롯을 이용하여 검증하였다. 각 주파수 구간에서 변동 크기(표준편차)를 예측하고, 이를 이용하여 비의도 전자기 방출 신호의 스펙트럼을 합성하였다. 제안된 기법은 기계학습에 필요한 대규모 전자기 방출 스펙트럼 데이터 확보에 사용할 수 있다.

Abstract

To synthesize the unintended electromagnetic emission (UEE) signals from diesel vehicles, the measured electromagnetic compatibility (EMC)/electromagnetic interference (EMI) data were categorized into three types based on their spectral characteristics and analyzed statistically. The assumption that the spectral fluctuation probability distribution function followed a normal distribution was validated using quantile-quantile plots. Subsequently, the magnitude of the fluctuation (standard deviation) was predicted for each frequency interval, and this information was used to synthesize the spectrum of the UEE signal. The proposed technique can be employed to secure the large-scale electromagnetic emission spectrum datasets required for machine learning applications.

Key words: Diesel Vehicle, Spectral Fluctuation, Unintended Electromagnetic Emissions

I. 서 론

디젤차(DV)는 비의도적 전자기 방출(unintended electromagnetic emissions)을 생성하는 부품의 수를 전기차(EV)에 비해 상대적으로 적게 포함한다. 또, 차종에 따라 부품의 종류가 크게 달라 UEE 스펙트럼의 특성 또한 차종마다 매우 다르다. 이러한 스펙트럼의 시뮬레이션 예측은 부품의 존재 여부, 부품의 방사 특성 등 많은 정보가 부족

하여 현실적으로 불가능하다. UEE 특성을 이용하여 차량을 분류하는 분류기를 설계할 때 전자기 호환성(EMC)/전자기 간섭(EMI) 분야에서 측정된 디젤차의 스펙트럼 수는 매우 부족하다. 이를 극복하기 위해, 방출 스펙트럼의 통계적 특성을 이용하여 스펙트럼을 합성하는 방식을 사용하면 분류기 학습에 사용할 수 있는 훈련 데이터를 합성할 수 있다^[1]. 본 논문에서는 전기차^[1]가 아닌 디젤차의 UEE 데이터를 합성한다.

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

인하대학교 전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Inha University)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0008-9213-7771>), 2: 정교수(<https://orcid.org/0000-0003-0014-2466>)

· Manuscript received November 12, 2025 ; Revised December 10, 2025 ; Accepted December 11, 2025. (ID No. 20251112-141)

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

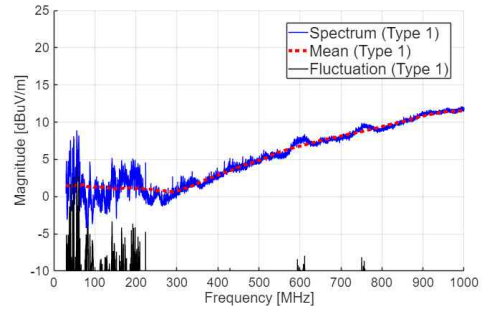
레이다 분야에서 시 영역 클러스터 신호를 합성하는 방법은 오랫동안 연구되어왔다^[2]. 레이다 에코 신호 크기의 확률밀도함수(pdf) 및 이 함수의 파라미터를 기반으로 후방 산란 신호 합성이 이루어진다. 예를 들어, 해수면 산란의 경우, 후방산란 크기를 계산하고, 이의 확률분포로 가우시안, 와이블, k-분포 등을 가정한다^[2]. 본 연구에서는 방출 신호를 합성하는 데 이 방법을 적용한다.

디젤차의 UEE 신호의 pdf 및 파라미터들은 알려져 있지 않다. 그러므로, 본 연구에서 스펙트럼 변동의 pdf 및 크기를 실험 데이터를 사용하여 예측한다. 운행 중 디젤 차량 내 많은 부품이 켜지고 꺼짐에 따라 방출 스펙트럼이 지속적으로 변동하여, 중심 극한 정리에 의해 방출 스펙트럼은 가우시안 과정(Gaussian process)으로 가정할 수 있다^[1]. II 장에서는 디젤차의 EMC/EMI 측정 데이터의 유형을 스펙트럼의 특성을 기반으로 세 가지로 나누고, 유형별 스펙트럼의 변동을 추정한다. III 장에서는 앞서 추정된 결과를 기반으로 스펙트럼을 가우시안 과정으로 근사하여 스펙트럼을 합성한다.

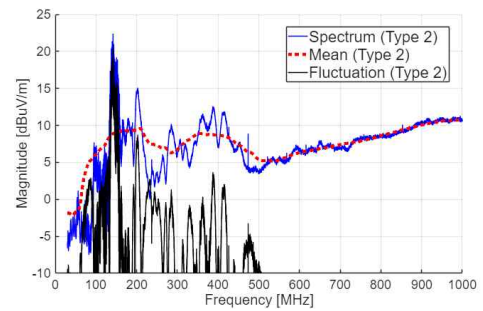
II. 스펙트럼 변동 추정

KS C 9990 표준에 근거해 측정된 32종류의 상업용 디젤차의 EMC/EMI 데이터를 분석한다. 측정 데이터는 많은 결정론적 선 스펙트럼(line spectrum)을 포함하고 있어, MATLAB의 ‘filloutliers’ 함수를 이용해 이를 제거하였다. 그림 1의 ‘mean’은 측정 스펙트럼 $S(f)$ 에 대해 전체 주파수 범위의 20% 크기의 윈도우를 갖는 단순이동평균을 적용하여 계산한 평균 스펙트럼이고, $S_{MA}(f)$ 로 표시한다. ‘fluctuation’은 변동 스펙트럼, 즉 $S_{fluc}(f) = S(f) - S_{MA}(f)$ 이다. 그림 1에서 보듯이, 디젤차의 변동 스펙트럼은 전기차와는 달리 측정 주파수 전체에 존재하지 않는 경우도 많으며, 변동 스펙트럼의 크기가 주파수 영역(저주파 및 고주파)에 따라 달라져, 방출 특성을 세 가지 유형으로 분류할 수 있다.

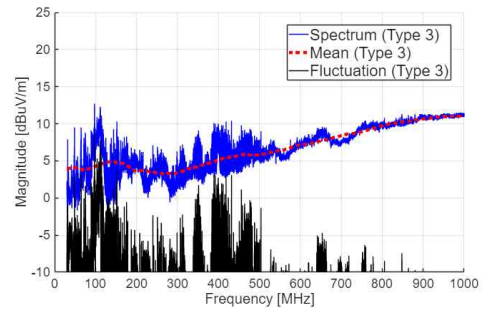
이런 스펙트럼을 확률과정으로 모델링하기 위해, 먼저, 각 32개의 변동 스펙트럼의 크기 특성이 크게 변하는 절점 주파수(f_c)를 찾는다. 이 절점주파수를 기준으로 주파수 범위를 저주파 및 고주파 영역으로 나누고, 각 (저)고주파 영역의 변동 스펙트럼 크기의 pdf 및 표준편차를 구한다. 분



(a) 유형 1
(a) Type 1



(b) 유형 2
(b) Type 2



(c) 유형 3
(c) Type 3

그림 1. 디젤차 실험 스펙트럼의 평균 및 변동 스펙트럼의 세 가지 종류

Fig. 1. Three types of experimental mean and fluctuation spectra of DVs.

류된 유형 1~3의 스펙트럼 수는 각각 12, 8 및 12개이다.

절점주파수, pdf 및 표준편차 계산 시 dB 단위인 스펙트럼 크기를 사용한다. 절점주파수를 구하기 위해, 식 (1)을 이용하여 포락선 $E(f)$ 를 계산한다.

$$E(f) = MA[S_{fluc}(f)]^2, W \quad (1)$$

표 1. 스펙트럼 유형별 절점주파수 값의 평균, 중간값 (단위: MHz)

Table 1. Mean and median values of the cutoff frequency by spectrum type (unit: MHz).

	Mean	Median
Type 1	238.37	238.82
Type 2	282.94	295.40
Type 3	352.90	372.45

이때 MA 는 단순이동평균이다. W 는 단순이동평균의 윈도우 크기이고, 다음과 같이 구한다: $|S_{fluc}(f)|^2$ 의 자기상관함수를 계산한 후, 원점에서의 값이 최초로 $1/e$ 감소하는 지점의 3배로 계산한다. f_c 는 데이터의 통계적 특성에서 급격한 변화를 탐지하는 CUSUM(cumulative sum) 알고리즘을 $E(f)$ 에 적용한다^[3]. $E(f) - mean(E(f))$ 을 누적합(cumulative sum)하고, 이것의 크기가 최대가 되는 주파수가 f_c 이다. 표 1은 각 유형별 f_c 의 평균 및 중간값이다. 예측한 대로, 값이 유형 1, 2, 3 순으로 커진다.

모든 스펙트럼에 대해 f_c 를 구한 후, 이를 기준으로 저주파와 고주파 영역으로 스펙트럼을 분할하고, 각 영역에 대해 변동 크기의 pdf 및 표준편차를 추정한다. 우선 pdf를 고려한다. 32개의 스펙트럼의 주파수 영역별 변동 크기의 pdf가 정규분포로 근사될 수 있는지 검증하기 위해

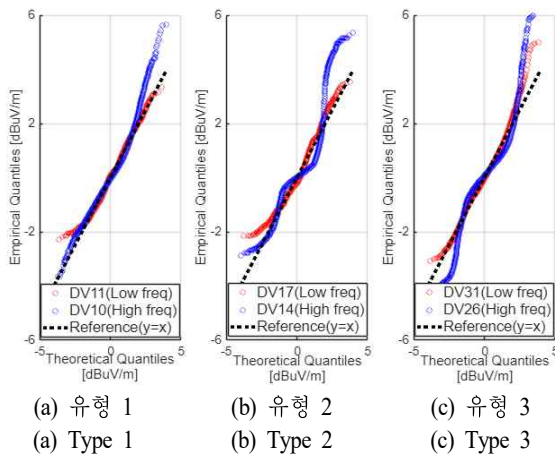


그림 2. 변동 스펙트럼 크기 확률밀도함수의 주파수 영역별 Q-Q 플롯

Fig. 2. Q-Q plots of fluctuation spectrum magnitude pdfs by frequency domain.

표 2. 스펙트럼의 유형 및 주파수 영역별 변동 스펙트럼 크기 확률밀도함수의 $D > 1$ dBuV/m인 샘플들의 비율 범위(단위: %)

Table 2. Range of sample number ratios with $D > 1$ dBuV/m in fluctuation spectrum magnitude pdfs, by spectrum type and frequency domain (unit: %).

	Low frequency	High frequency
Type 1	0.000~0.078	0.013~0.645
Type 2	0.020~0.091	0.000~2.569
Type 3	0.000~0.126	0.310~2.026

표 3. 스펙트럼의 유형 및 주파수 영역별 변동 스펙트럼 크기의 표준편차의 평균, 중간값(단위: dBuV/m)

Table 3. Mean and median values of standard deviation of fluctuation spectrum magnitude by spectrum type and frequency domain (unit: dBuV/m).

		Mean	Median
Type 1	Low	2.097	2.033
	High	0.461	0.452
Type 2	Low	4.048	4.118
	High	1.051	1.059
Type 3	Low	2.510	2.454
	High	0.702	0.675

Q-Q 플롯(quantile-quantile plot)을 이용하였다. 그림 2는 각 유형의 주파수 영역별 샘플들이 정규분포로부터 가장 크게 벗어난 데이터 분포의 Q-Q 플롯이다. pdf 간의 괴리를 측정하기 위해, 경험적 분위수(empirical quantile)와 이론적 분위수(theoretical quantile) 사이의 거리를 D 로 정의하였다. 표 2는 각 유형 및 주파수 영역별로 $D > 1$ dBuV/m인 측정 데이터 샘플의 비율 범위를 보여준다. 표 2에서 임계값을 0.5 dBuV/m로 줄였을 때 비율이 5%를 초과하는 데이터의 개수는 3개뿐이다. 작은 비율의 샘플만이 이론적 분위수에서 크게 벗어나 있어, 정규분포로 변동 스펙트럼 크기의 pdf를 근사할 수 있다.

스펙트럼 유형 및 주파수 영역별로 계산된 변동 스펙트럼 크기의 표준편차는 표 3에 정리되었다. 그림 1에서 보듯이, 모든 유형에서 저주파 영역의 표준편차 값이 고주파 영역보다 크다. 또한, 저주파 영역의 표준편차 값이

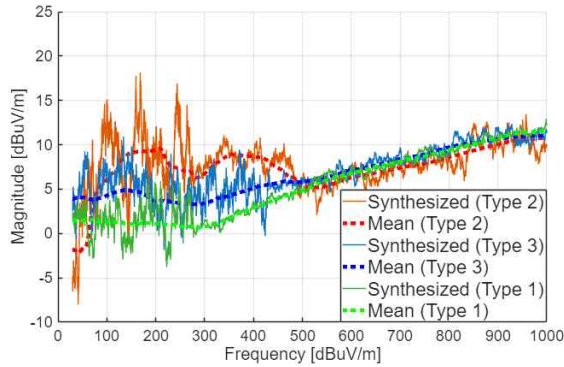


그림 3. 디젤차 방출 스펙트럼의 유형별 합성 스펙트럼
Fig. 3. Synthesized spectra of diesel vehicle emissions by type.

유형 1, 3, 2 순으로 증가한다. 즉, 세 가지 유형은 모두 변동 크기의 표준편차 및 f_c 의 특성이 달라, 다른 스펙트럼으로 분류할 수 있다.

III. 스펙트럼 합성

모든 유형의 변동 스펙트럼 크기의 pdf가 정규분포로 근사될 수 있고, 각 유형 및 주파수 영역별 변동 크기의 표준편차는 표 3과 같이 주어진다. 이를 기반으로 디젤차 방출 스펙트럼을 가우시안 과정으로 모델링하면, 식 (2)와 같이 표현된다⁴⁾.

$$S(f) \sim GP[\mu(f), \Sigma] \quad (2)$$

이때 $\mu(f)$ 는 평균 스펙트럼, Σ 는 분산-공분산 행렬을 의미한다. $\mu(f)$ 는 그림 1의 $S_{MA}(f)$ 로 추정된 값을 사용한다. Σ 의 대각성분인 분산은 표 3의 표준편차 값을 이용해 (저)고주파수 구간별로 적용하고, 비대각성분인 공분산은 분산에 자기상관함수 $\rho^{df/f_{lag}}$ 를 곱하여 구할 수 있다. 자기상관함수는 지수함수를 가정하며, ρ 는 자기상관계수, f_{lag} 는 주파수 상관거리를 의미한다. ρ 의 값이 0.2일 때, f_{lag} 값은 스펙트럼 유형 및 주파수 영역별로 크게 차이 나지 않는다. 예측한 f_{lag} 의 평균 및 중간값은 13.60, 13.65 MHz이다. 그러므로, 스펙트럼 합성 시 이 f_{lag} 를 모든 차종 및 저주파와 고주파 영역에 적용한다.

그림 3은 각 유형별 디젤차의 합성된 UEE 스펙트럼을

보여준다. 평균 스펙트럼은 그림 1의 각 유형의 $S_{MA}(f)$ 을, 표준편차는 표 3의 중간값을, 그리고 주파수 상관거리 f_{lag} 은 중간값인 13.65 MHz를 사용하였다. 예측했던 대로, 합성 스펙트럼 변동의 크기는 절점주파수를 기준으로 저주파 영역에서 크고 고주파 영역에서는 작다. 이는 식 (2)를 이용한 스펙트럼 합성이 스펙트럼 유형에 따른 특성을 잘 반영하고 있음을 보인다.

IV. 결 론

디젤차의 EMC/EMI 실험 데이터를 이용해 비의도 전자기 방출 스펙트럼을 세 가지 유형으로 나누고, 그 특성을 통계적으로 분석하였다. 변동 스펙트럼 크기의 확률밀도함수는 저주파 및 고주파 영역에서 각각 정규분포로 근사되고, 유형 및 주파수 영역에 따라 구별되는 변동 크기의 표준편차를 가짐을 확인했다. 디젤차의 방출 스펙트럼을 가우시안 과정으로 모델링하여 스펙트럼을 합성하였으며, 합성된 스펙트럼은 유형별 특성을 잘 보여주었다. 제안된 차량의 비의도 전자기 방출 스펙트럼 생성 기법은 기계학습과 같이 대규모 학습 데이터 세트가 필요한 분야에 적용될 수 있다.

References

- [1] J. Park, I. Koh, "Experimental verification of simulated spectral fluctuation of unintended electromagnetic emissions from electric vehicles," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, to be published. doi:10.26866/jees.2026.3.r.346
- [2] I. Antipov, "Simulation of sea clutter returns," Defence Science and Technology Organisation (DSTO), Australia, DSTO-TR-0679, Jun. 1998.
- [3] M. Basseville, I. V. Nikiforov, *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*, Hoboken, NJ, Prentice Hall, 1993.
- [4] A. Leon-Garcia, *Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering*, Hoboken, NJ, Prentice Hall, 2008.