

전자파 노이즈 간섭에 따른 무선 기기 간 통신 품질 분석 및 무선 주파수 내성 평가법 설계

Design of a Radio Frequency Immunity Evaluation Method and Communication Performance Analysis for Wireless Devices under Electromagnetic Noise Interference

김 나 은 · 송 익 환

Naeun Kim · Eakhwan Song

요 약

본 논문에서는 근역장 노이즈 주입 시험을 통해 무선 통신 기기의 무선 주파수 간섭에 대한 내성을 정량적으로 평가하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 근역장 방사 측정을 통해 시스템 내 무선 주파수 내성 취약 지점을 탐색하고 해당 위치에 주파수별 근역장 노이즈를 주입한 후 지연 시간(latency)과 총 전송량(transfer bytes)의 변화를 측정 및 분석한다. 이를 바탕으로 측정된 통신 품질 지표 변화 양상을 정상 구간, 성능 열화 구간, 기능 불능 구간의 세 구간으로 분할하여 각 구간별 지표에 따른 선형 모델로 단순화하고, 성능 열화 구간과 기능 불능 구간의 모델을 면적으로 환산한 NSI(noise susceptibility index)를 무선 통신 시스템의 무선 주파수 내성 평가 지표로 정의한다. 제안된 방법을 통해 주입 노이즈 주파수에 따라 측정된 NSI 지표를 평가함으로써, 무선 통신 기기의 주파수별 무선 주파수 내성 수준을 정량적으로 비교 및 평가할 수 있음을 검증하였다.

Abstract

This study proposed a quantitative evaluation method to assess the radio frequency immunity of wireless communication devices through near-field noise injection testing. The proposed method identified the radio frequency susceptibility parts within the system by measuring the near-field radiation, injected near-field noise at various frequencies into these areas, and measured and analyzed the resulting variations in latency and total transfer bytes. Based on this, the variations in communication quality metrics were divided into three segments: normal, performance degradation, and functional failure. Each segment was simplified using a linear model, and the resulting area was defined as the noise susceptibility index (NSI) that served as a radio frequency immunity evaluation metric for wireless communication systems. The method was experimentally validated by comparing the NSI values obtained under various frequency conditions, confirming its ability to quantitatively evaluate the radio frequency immunity levels of wireless communication devices at different frequencies.

Key words: Near-Field Noise Injection, Quantitative Evaluation, Radio-Frequency Immunity, Wireless Communication

「이 논문은 2024년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업과 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-23-005).」

광운대학교 전자통신공학과(Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received July 19, 2025 ; Revised July 30, 2025 ; Accepted October 27, 2025. (ID No. 20250719-070)

· Corresponding Author: Eakhwan Song (e-mail: esong@kw.ac.kr)

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템은 소형화, 고속화 및 고기능화에 따라 시스템의 집적도가 증가하고 있으며, 시스템 내부의 여러 디지털/RF 집적회로(IC, integrated circuits) 및 모듈과 같은 다양한 부품들이 매우 근접하게 배치되고 있다. 이로 인해 디지털 부품의 고속 스위칭 노이즈로부터 발생하는 전자파가 시스템 내부 안테나에 간섭을 일으키는 무선 주파수 간섭(RFI, radio-frequency interference) 문제가 대두되고 있다^{[1][2]}. 이러한 무선 주파수 간섭 현상은 통신 품질 저하를 야기하며, 통신 시스템 설계 시 이에 대한 정량적 분석과 시스템의 내성 확보 기술이 요구된다. 그러나 IEC 61000-4-3 등 기존의 국제 표준에 준거한 전자기 내성 평가는 기기의 기능 이상 여부를 중심으로 한 정성적 방식에 기반하고 있어 실제 무선 통신 품질의 미세한 열화를 정량화하지 못하고, 고속 통신 모듈이 복합적으로 작동하는 환경에서의 국소적 민감도 차이를 반영하는 데 한계가 있다^[3].

본 논문에서는 근역장 방사 측정을 통해 무선 통신 시스템의 무선 주파수 내성 취약 지점을 탐색하고, 식별된 취약 지점에 근역장 노이즈를 주입하여 통신 성능 열화 현상을 정량적으로 평가하는 방법을 제안한다. 주입 노이즈의 주파수에 따른 무선 통신 기기의 무선 주파수 내성을 구간별 통신 성능 지표를 활용하여 선형 모델링하고, 이를 기반으로 각 주파수에 따른 무선 통신 시스템의 내성을 정량화한 NSI(noise susceptibility index) 평가 지표가 새로이 제안되었다. 제안된 평가법은 무선 통신 시스템이 데이터를 송수신하는 환경에서 통신 중심 채널 주파수 및 인접 주파수 대역의 근역장 노이즈를 주입하고 통신 품질 지표를 측정하고, 각 주파수별 내성을 정량적으로 평가함으로써 실험적으로 검증되었다.

II. 근역장 무선 주파수 노이즈 측정 기반 공간적 무선 주파수 내성 취약 지점 탐색

무선 통신 시스템 내 무선 주파수 간섭이 발생하는 위치에 따라 노이즈의 전달 경로 및 결합 크기가 결정되므로, 정량적으로 재현성 높은 내성 평가를 위해서는 대상

시스템 내 무선 주파수 간섭에 가장 취약한 지점의 탐색이 선행되어야 한다. 일반적으로 수신 안테나 및 RF front-end 부품이 가장 취약한 지점으로 간주되지만 DUT의 회로 설계 및 구성에 대한 정보가 제한적인 경우와 그 외의 영역에서 취약점이 존재할 가능성을 배제할 수 없다. 이에 본 연구에서는 최적의 평가 지점을 특정하기 위해 전자기파의 가역성을 기반으로 근역장 노이즈 방사가 발생하는 주요 영역에서 무선 주파수 내성이 동시에 취약할 것으로 가정한다. 그림 1은 근역장 노이즈 방사 측정 셋업을 보여주며, 제안된 가정을 검증하기 위한 DUT(device under test)로는 Wi-Fi 통신 환경에서 동작하는 라즈베리파이 4B가 사용되었다. 평가 DUT 간의 온전한 통신 성능 평가를 위해 별도의 액세스 포인트 없이 송수신 기기가 직접 연결되는 Ad-hoc 모드 환경에서 통신 수행 중 발생하는 근역장 노이즈 방사를 측정하였다^{[4][5]}. 중심 주파수가 2.432 GHz인 5번 Wi-Fi 채널을 이용하여 동작하는 송수신 모듈 및 해당 안테나 주변부를 방사 측정 영역으로 지정하고, 자기장 프로브(magnetic probe)를 스펙트럼 분석기에 연결하여 DUT 표면으로부터 1 mm 위에 고정 및 1×1 mm 간격의 해상도로 근역장 노이즈 스캐닝을 수행하였다^[6]. 각 측정 지점에서 스펙트럼 분석기의 max hold 모드를 사용하여 방사 강도를 기록하고 이를 통해 DUT 표면의 주파수별 무선 주파수 방사 분포를 정량적으로 측정한 결과, Wi-Fi 중심 주파수인 2.432 GHz를 포함한 약 22 MHz 대역폭 범위 내에서 그림 2와 같은 강한 무선 주파수 방사 현상을 관측할 수 있다.

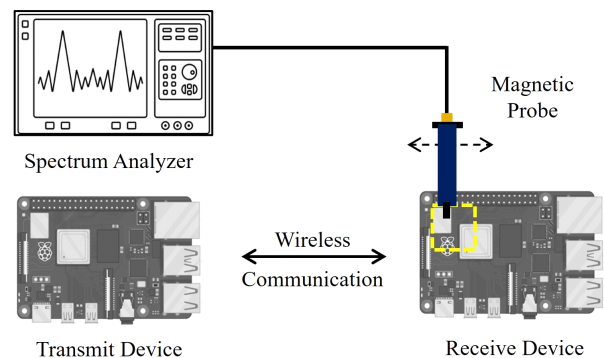


그림 1. 근역장 노이즈 방사 측정 셋업
Fig. 1. Setup for near-field noise emission measurement.

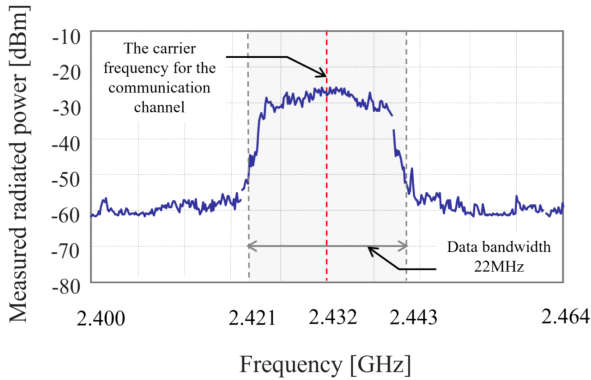


그림 2. Wi-Fi 신호의 근역장 측정 결과
Fig. 2. Near-field measurement results on the Wi-Fi signals.

강한 방사가 발생하는 영역이 무선 주파수 내성 관점에서 취약할 것이라는 제안된 가정을 검증하기 위해, 본 연구에서는 그림 3과 같이 무선 통신 시스템의 고방사 영역에서 무선 주파수 내성을 평가할 수 있는 시험 환경을 구축하였다. Wi-Fi 통신 환경에서 수신기를 DUT로 설정하고, 신호 발생기에서 생성한 신호를 40 dB의 이득으로 증폭한 뒤 동일한 자기장 프로브를 통해 DUT 표면으로부터 1 mm 위에서 노이즈를 주입하였다. 주입 위치는 앞서 수행한 근역장 방사 측정과 동일한 영역으로 설정하였으며, Wi-Fi 통신 중심 채널 주파수와 동일한 노이즈를 낮은 세기부터 시작하여 1 dBm 간격으로 점진적으로 증가시키며 인가하였다. 각 위치에서 통신 지연 시간이

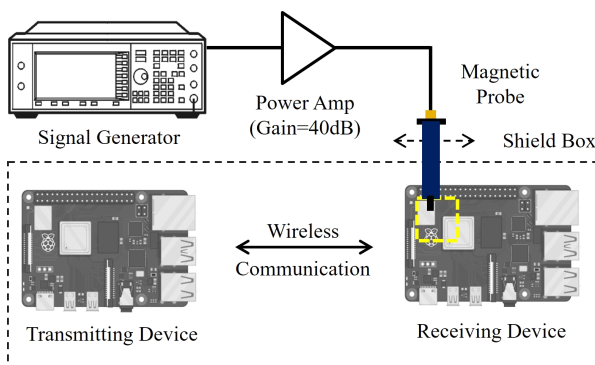


그림 3. 제안된 무선 통신 시스템의 무선 주파수 내성 평가 셋업
Fig. 3. Proposed radio-frequency immunity evaluation setup for wireless communication system.

1000 ms를 초과하는 최초의 오류 발생 시점의 증폭 전 신호 발생기 출력 노이즈 크기를 DUT의 무선 주파수 내성 측정치로 정의하였다. 1000 ms의 오류 발생 기준은 지연 시간 통신 품질 평가의 민감도에 따라 유동적으로 조정하여 제안된 평가법에 적용될 수 있다. DUT의 고방사 지점에서 비교적 낮은 크기의 노이즈 주입에도 통신 오류가 발생함을 확인함으로써, 제안된 평가법에서 가정한 노이즈 고방사 영역과 내성 취약 영역 간의 가역성 관계를 실험적으로 확인하였다(그림 4).

III. 제안된 선형 모델링 기반 무선 통신 시스템의 무선 주파수 내성 평가법

본 장에서는 근역장 노이즈 주파수에 따른 무선 통신 기기의 무선 주파수 내성을 정량적으로 평가하기 위해, 제 II장에서 탐색된 시스템 내 가장 내성이 취약한 영역을 대상으로 무선 주파수 내성 시험을 수행하였다.

DUT의 통신 중심 채널 주파수를 기준으로 ± 10 MHz 범위 내에서 5 MHz 간격의 총 5개 주파수를 선정하였으며, 각 주파수별로 -5 dBm부터 19 dBm까지 1 dBm 간격으로 근역장 노이즈의 주입 크기를 점진적으로 증가시키며 인가하였다. 이때 DUT는 앞서 제안한 시험 셋업과 동일한 조건에서 기기 간 직접 무선 통신을 수행하는 상태로 유지되었으며, 외부 무선 주파수 간섭의 영향을 최소

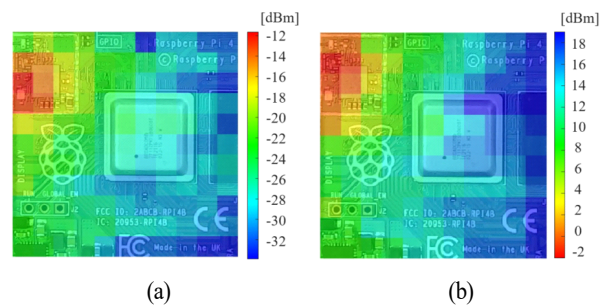


그림 4. 2.432 GHz에서 (a) 측정된 Wi-Fi 신호의 무선 주파수 노이즈 방사 분포, (b) 측정된 Wi-Fi 신호의 무선 주파수 노이즈 내성 분포
Fig. 4. Measured spatial distribution at 2.432 GHz on (a) the radio-frequency noise emission and (b) the radio-frequency noise immunity for Wi-Fi signals.

화하기 위해 본 연구에 사용된 중심 통신 채널 주파수와 간섭을 일으키지 않는 공진 주파수 특성을 갖는 차폐 합체 내 DUT 및 통신 환경 공간을 배치하였다. 제안된 평가법에 사용되는 정량적 성능 지표의 추출을 위해 통신 성능을 측정하는 대표적인 지표인 지연 시간(latency)과 총 전송량(transfer bytes)을 각각 측정하는 Ping 명령어와 Iperf3 도구가 활용되었다^{[7],[8]}. Ping은 ICMP(internet control message protocol) 기반으로 동작하며 데이터 패킷의 왕복 시간을 측정하여 지연 시간 지표를 산출하고, Iperf3는 TCP 연결을 통해 데이터를 송수신하면서 총 전송량을 측정하며 이 두 지표는 무선 주파수 내성 평가의 정량적 지표로 활용된다. 그림 5는 2.422 GHz의 주입 근역장 노이즈 크기 변화에 따른 지연 시간 및 총 전송량 지표의 측정 결과를 나타낸 것으로 동일 조건에서 3회 반복 실험을 수행하였다. 두 지표 모두 평균 오차가 3% 이내로 수렴함을 확인하였으며, 이를 통해 측정 결과의 재현성이 확보되었음을 바탕으로 이후 본 실험에서는 동일 조건에서의 단일 측정값을 기준으로 분석을 수행하였다.

그림 6은 각 주파수에 대해 주입 노이즈 크기에 따른 지연 시간 측정 결과를 보여준다. 주입 근역장 노이즈의 크기가 커질수록 지연 시간이 증가하는 경향을 보이며 통신 성능이 점진적으로 열화됨을 확인할 수 있다. 그림 7은 동

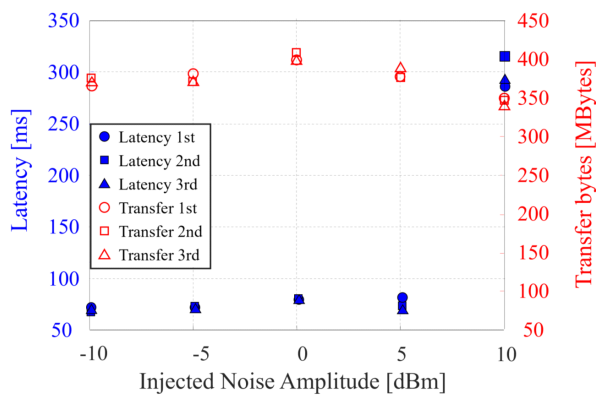


그림 5. 2.422 GHz 근역장 노이즈 주입 시 주입 노이즈 크기 변화에 따른 지연 시간 및 총 전송량 3회 측정 결과

Fig. 5. Three repeated measurements of latency and transfer bytes according to the injected noise amplitude at 2.422 GHz near-field noise injection.

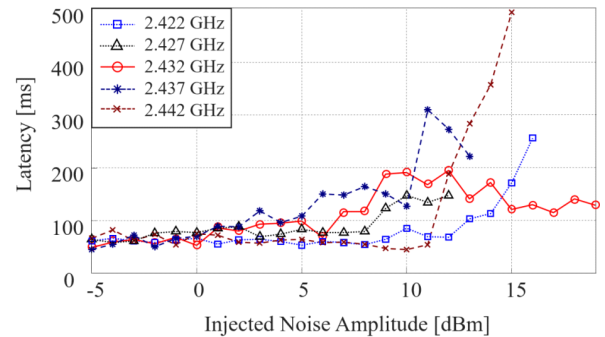


그림 6. 주입 노이즈의 주파수 및 크기에 따른 지연 시간 측정 결과

Fig. 6. Latency measurement results for varying noise amplitudes at different injected noise frequencies.

일한 조건에서 60초 동안 측정된 총 전송량의 변화를 보여주며, 지연 시간 지표와 반대로 주입 근역장 노이즈 크기가 증가할수록 총 전송량은 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 각 지표의 특정 임계값을 기준으로 노이즈 주입에 따른 영향을 받지 않는 정상 구간과 선형적으로 증가하는 구간이 관측되었고, 이 선형 구간의 기울기로 나타나는 각 지표의 노이즈에 대한 민감도 역시 주파수에 따라 상이하게 나타났다. 또한 통신 불능 상태로 진입하는 지점의 주입 노이즈 크기도 주파수별로 차이를 보였다.

이러한 관측 결과에 근거하여 본 연구에서는 제안된 평가법의 개념을 도식화한 그림 8 및 그림 9와 같이 주입 근역장 노이즈의 주파수에 따른 무선 주파수 내성을 정

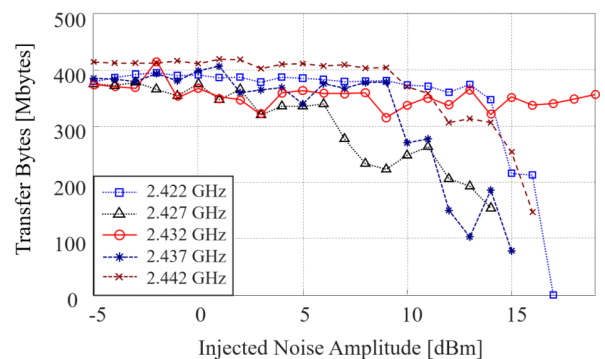


그림 7. 주입 노이즈의 주파수 및 크기에 따른 총 전송량 측정 결과

Fig. 7. Transfer bytes measurement results for varying noise amplitudes at different injected noise frequencies.

상 구간, 성능 열화 구간, 기능 불능 구간의 세 구간으로 구분하고 각 구간 지표를 이용하여 정량화하고 이를 기반으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 평가법에 사용된 지표인 지연 시간과 총 전송량에 대하여 안정적 통신 성능의 기준이 되는 임계값을 LT_{TH} 와 TB_{TH} 로 각각 설정하고, 임계값을 초과하는 최초 근역장 노이즈의 크기 A_{TH} 와 기능 불능(hard failure) 발생 크기 A_{HF} 사이의

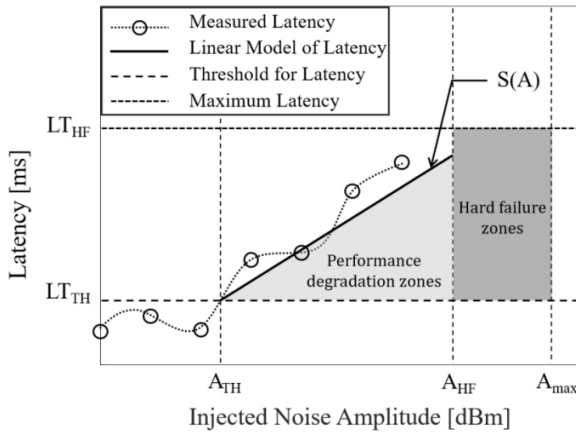


그림 8. 제안된 지연 시간 지표의 선형 모델링 기반 무선 주파수 내성 평가법

Fig. 8. Proposed radio-frequency immunity evaluation method based on linear modeling of latency.

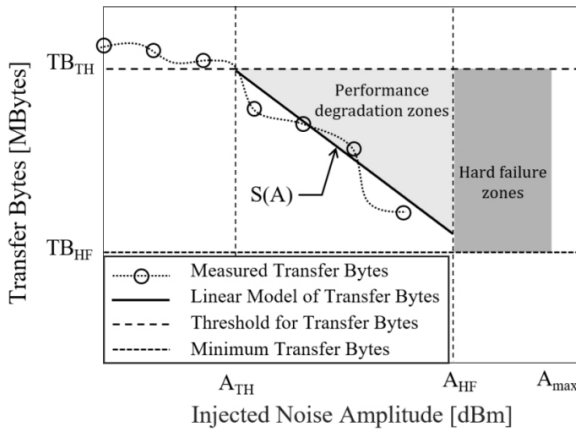


그림 9. 제안된 총 전송량 지표의 선형 모델링 기반 무선 주파수 내성 평가법

Fig. 9. Proposed radio-frequency immunity evaluation method based on linear modeling of transfer bytes.

구간을 선형 모델로 근사하여 성능 열화 구간(performance degradation zone)으로 정의하였다. 성능 열화 구간에서의 선형 모델은 해당 구간에서 측정된 각 성능 지표 측정치에 대해 최소자승법(least squares method)을 이용한 1차 선형 근사를 통해 추출되며, 이때 도출된 기울기 $S(A)$ 는 성능 열화 민감도를 나타내는 정량적 지표로 정의된다^[9]. 또한 각 지표가 측정되지 않는 A_{HF} 이후 구간을 기능 불능 구간(hard failure zones)으로 정의하고, 이 구간 지표의 대푯값은 모든 실험 주파수 대역에서 측정된 지연 시간과 총 전송량 값 중 가장 열화가 큰 측정치로 하여 각 LT_{HF} 와 TB_{HF} 로 고정하였다.

본 연구에서는 이러한 통신 시스템의 노이즈 주입 주파수별 각 통신 성능에 대한 대표 평가 지표로써 NSI(noise susceptibility index)를 새로이 제안하였다. 제안된 NSI는 외부 노이즈에 대한 지연 시간과 총 전송량의 각 통신 성능 지표의 내성을 정량화할 수 있도록 성능 열화 구간과 기능 불능 구간 모델의 임계점 대비 산출된 면적을 기준으로 설계되었다. 성능 열화 구간에서의 내성 정량화 지표는 해당 구간에서의 외부 노이즈에 대한 선형 모델과 정상 구간을 정의하는 임계점 상수값이 형성하는 삼각형 면적에 의해 산출된다. 기능 불능 구간에서는 앞서 전체 노이즈 주파수에 대해 측정된 최대 성능 열화치로 설정된 기능 불능 구간의 대푯값과 기능 불능 구간 시작 지점에서의 노이즈 크기인 A_{HF} 와 최대 노이즈 크기 A_{max} 구간이 형성하는 사각형 면적으로 산출된다. 이에 따라 지연 시간과 총 전송량의 각 성능 지표별로 제안된 NSI는 식(1) 및 식(2)와 같다.

$$NSI_{Latency} = \frac{1}{2}|S(A)|(A_{HF} - A_{TH})^2 + (A_{max} - A_{HF})(LT_{HF} - LT_{TH}) \quad (1)$$

$$NSI_{Transfer} = \frac{1}{2}|S(A)|(A_{HF} - A_{TH})^2 + (A_{max} - A_{HF})(TB_{TH} - TB_{HF}) \quad (2)$$

제안된 NSI 정량화 모델은 성능 열화 구간에서 선형 모델의 기울기에 해당하는 외부 노이즈에 대한 성능 지표 열화의 민감도 및 최초 성능 열화가 발생하는 외부 노이즈 크기가 반영되어, 크기가 증가하는 외부 노이즈 환경에서 보다 작은 크기의 노이즈에서 성능 열화가 시작

되고 열화가 시작된 후 외부 노이즈 크기에 따라 빠르게 열화가 가속되는 평가 케이스일수록 큰 값을 가지게 된다. 또한 기능 불능 구간에서 역시 보다 작은 노이즈 크기에 의해 기능 불능이 발생할수록 큰 평가 지표 값을 가지도록 설계되었다. 이를 통해 정상 구간을 제외한 모든 구간에서 외부 노이즈의 크기와 외부 노이즈에 대한 성능 열화 민감도 영향을 동시에 반영하여, 제안된 NSI 지표가 크게 산출될수록 통신 시스템의 외부 노이즈에 대한 내성이 취약하다고 평가할 수 있다. 또한 제안된 NSI 평가 지표는 각 주입 노이즈 주파수별 내성의 대푯값으로 산출되어, 평가 대상 통신 시스템의 주파수별 무선 주파수 내성을 정량화할 수 있다.

IV. 측정 및 검증

본 장에서는 제 III장에서 제안된 무선 통신 시스템의 무선 주파수 내성 평가법을 검증하기 위해 주입 노이즈 크기에 따른 대상 시료의 성능 지표를 측정하고, 제안된 평가법을 적용하여 각 주파수별 무선 주파수 내성을 정량화한 결과를 제시한다. 검증을 위한 측정은 그림 3의 노이즈 주입 주파수에 따른 무선 주파수 내성 평가 셋업을 동일하게 사용하여 수행되었다.

그림 10 및 그림 11은 통신 중심 채널 주파수인 2.432 GHz를 기준으로 무선 주파수 내성이 상대적으로 취약한 인접 주파수인 2.437 GHz를 대표 사례로 선정하여 해당 주파수에서 측정된 지연 시간 및 총 전송량을 기반으로 제안된 평가 지표인 NSI를 적용한 결과를 나타낸다. 본 측정 기반 검증에서는 지연 시간과 총 전송량의 정상 구간을 설정하는 임계값인 LT_{TH} 와 TB_{TH} 를 각각 90 ms 및 340 MBytes로 선정하였으며, 이는 노이즈 비주입 상태에서의 평균 성능 값에 마진을 부여하여 안정적 통신이 가능하다고 판단되는 기준에 준거하여 설정되었다. 점선으로 표기된 각 주파수별 성능 지표들의 측정 결과가 주입 노이즈 크기에 따라 선형적으로 열화되는 것을 확인하고, 제안된 방법에 따라 성능 열화 구간을 선형 모델링한 결과는 실선으로 표기하였다. 제안된 선형 모델 기반의 구간별 분할에 따라 성능 열화 구간과 기능 불능 구간이 구분됨을 확인하였으며, 기능 불능 구간에서 각 성능 열화

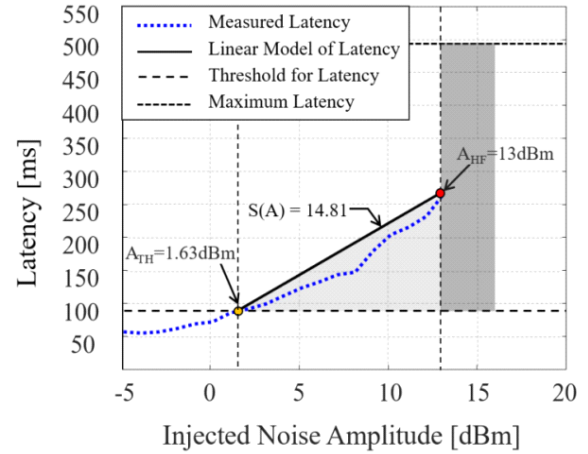


그림 10. 2.437 GHz 근역장 노이즈 주입 시 지연 시간 지표 기반 제안된 평가법 적용 결과

Fig. 10. Application results of the proposed evaluation method based on latency metric under 2.437 GHz near-field noise injection.

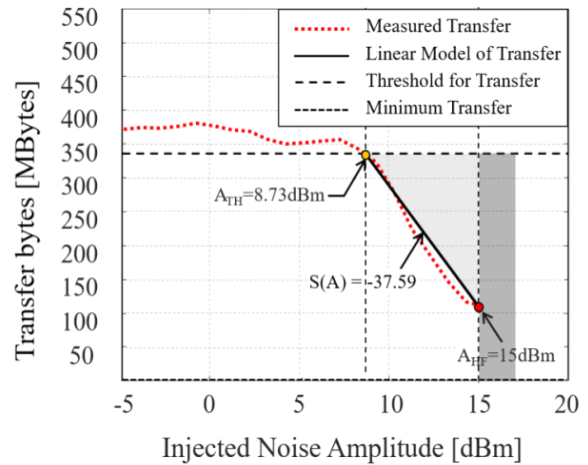


그림 11. 2.437 GHz 근역장 노이즈 주입 시 총 전송량 지표 기반 제안된 평가법 적용 결과

Fig. 11. Application results of the proposed evaluation method based on Transfer bytes metric under 2.437 GHz near-field noise injection.

지표의 대푯값인 LT_{HF} 와 TB_{HF} 는 III장에서 정의한 기준에 의해 각 494 ms와 0.827 MBytes로 측정되었다.

그림 12는 측정 검증에 사용된 모든 주파수에 대해 제안된 방법을 적용하여 지연 시간과 총 전송량의 성능 열

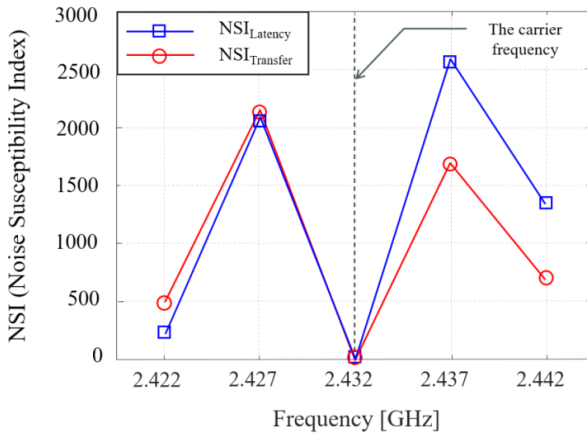


그림 12. 주파수별 NSI(noise susceptibility index) 도출 결과
Fig. 12. Noise susceptibility index (NSI) results for each injected noise frequency.

화를 정량화한 NSI 지표의 결과를 보여주며, 상세한 수치는 표 1에 정리하였다. 통신 중심 채널 주파수인 2.432 GHz에서는 NSI 지표가 상대적으로 낮게 나타나 우수한 내성을 보인 반면, 인접한 사이드밴드 주파수인 2.422 GHz와 2.437 GHz에서는 높은 NSI 지표와 함께 내성이 취약한 것으로 확인되었다. 이는 사용된 Wi-Fi 채널 설정 기준 중심 채널 주파수 주변 22 MHz의 데이터 대역(data bandwidth) 내에 실제 데이터 정보가 변조되어 존재하기 때문에 데이터 정보가 존재하지 않는 중심 주파수에서는 오류가 발생하지 않으며, 데이터 대역에 해당하는 주파수의 노이즈가 인가될 경우 통신 성능 열화가 발생한다는 것을 의미한다. 또한 해당 측정 결과에서 지연 시간 NSI 지표와 총 전송량 NSI 지표 모두 동일한 경향성을 보임에 따라, 서로 다른 특성을 가지는 두 통신 성능 지표

표 1. 주파수별 NSI(noise susceptibility index) 도출 결과
Table 1. Noise susceptibility index(NSI) results for each injected noise frequency.

Injected noise frequency (GHz)	NSI _{Latency}	NSI _{Transfer}
2.422	180.9	417.1
2.427	1748.6	1797.9
2.432	0	0
2.437	2168.9	1416.1
2.442	1120.5	578.6

모두에 제안된 방법이 일반적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 제안된 평가법은 지연 시간 및 총 전송량 지표에서 주입 근역장 노이즈 크기에 대한 선형성이 관측된다는 전제 하에 설계되었으며, 동일한 선형성이 확인되는 경우 다른 통신 성능 지표에도 적용 가능하다. 측정 검증 결과에 근거하여, 제안된 무선 주파수 내성 평가법은 기존의 단순한 동작성 여부 판단을 넘어 주파수별로 무선 통신 기기의 무선 주파수 간섭에 대한 내성 수준을 정량적으로 분석할 수 있음이 확인되었다. 특히 제안된 평가법은 각 주파수에 따른 노이즈 내성 지표의 대푯값을 산출함으로써 무선 통신 시스템의 취약 주파수 대역을 효과적으로 식별할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 평가법은 주파수에 따른 무선 주파수 내성 평가용으로 설계되어 정밀한 디버깅 도구로서의 사용에는 제한이 있으나 설계자가 통신 시스템의 성능 마진에 따라 임계값을 유연하게 설정하고 제안된 평가법에 적용함에 따라 시스템 설계 및 디버깅 요소를 적용 시 무선 주파수 내성 관점에서 정량화된 세부 기준을 설정하는 데 효과적으로 활용될 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 근역장 노이즈 주입을 통해 무선 통신 기기의 무선 주파수 내성을 정량적으로 평가하는 방법을 제안하였다. 시스템 내 무선 주파수 방사 수준이 높은 지점을 내성 취약 지점으로 설정하고, 다양한 주파수 및 크기의 근역장 노이즈를 주입한 후 측정된 지연 시간과 전송량 지표를 기반으로 통신 시스템의 내성을 정상 구간, 성능 열화 구간, 기능 불능 구간의 세 구간으로 구분하여 선형 모델링을 통해 정량화한 지표인 NSI를 제안하였다. 제안된 평가법을 이용하여 대상 기기 간 직접 통신을 수행하는 환경에서 통신 중심 채널 주파수 및 인접 주파수에 대한 무선 주파수 내성 평가를 수행하였으며, 노이즈 주파수에 따른 통신 품질의 내성을 정량적으로 추출함으로써 제안된 방법의 효용성을 실험적으로 검증하였다. 제안된 방법은 주파수별 무선 주파수 내성 수준을 정량적으로 비교하고 취약 주파수 대역을 효과적으로 식별함으로써 다양한 무선 장치 및 고속 통신 환경에서의 실용적

인 무선 주파수 내성 평가 시스템으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] S. Grivet-Talocia, M. Bandinu, F. Canavero, I. Kelandar, and P. Kotiranta, "Fast assessment of antenna-PCB coupling in mobile devices: A macromodeling approach," in *2009 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Jan. 2009, pp. 193-196.
- [2] M. Ramdani, E. Sicard, A. Boyer, S. B. Dhia, J. J. Whalen, and T. H. Hubing, et al., "The electromagnetic compatibility of integrated circuits: Past, present, and future," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 1, pp. 78-100, Feb. 2009.
- [3] *IEC EMC-Testing and Measurement Techniques: Radiated, Radio-frequency, Electromagnetic Field Immunity Test*, IEC 61000-4-3, Sep. 2020.
- [4] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*, IEEE Std 802.15.4-2020(Revision of IEEE Std 802.15.4-2015), May 2020.
- [5] *IEEE Standard for Information Technology –Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks –Specific Requirements –Part 11: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications*, IEEE Std 802.11-2020(Revision of IEEE Std 802.11-2016), Feb. 2021.
- [6] *IEC Integrated Circuits - Measurement of Electromagnetic Emissions, 150kHz to 1 GHz - Part 6: Measurement of Conducted Emissions - Magnetic Probe Method*, IEC 61967-6, Jun. 2002.
- [7] J. Postel, "Internet control message protocol: STD 5 RFC 792," 1981. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc792>
- [8] ESnet, "iperf3: A TCP, UDP, and SCTP network bandwidth measurement tool," 2025. Available: <https://github.com/esnet/iperf>
- [9] W. J. Palm, *Introduction to MATLAB for Engineers*, 3rd ed. Columbus, OH, McGraw-Hill, 2010.

김 나 은 [광운대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-6320-0918>



2022년 3월 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 학사과정

[주 관심분야] Near-Field Measurement Techniques, System-Level EMI/EMC

송 익 환 [광운대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4176-6179>



2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

2006년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2010년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

2011년 ~ 2013년: 삼성전자 글로벌기술센터 책임연구원

2014년 ~ 현재: 광운대학교 전자통신공학과 교수

[주 관심분야] System-Level EMC/EMI, High-Speed Signal Integrity/Power Integrity, Electromagnetic Measurements Technologies