

광대역 시험 신호원과 기존 시험 신호원이 대상 기기의 내성 특성에 미치는 거동 비교에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Radiated Immunity Comparison between Broadband and Conventional Test Signals on the Equipment Under Test

최경륜 · 홍영기 · 권태욱 · 금홍식* · 박세은** · 나완수

GyeongRyun Choi · Younggi Hong · Taewook Kwon · Hongsik Keum* · Se-eun Park** · Wansoo Nah

요 약

본 논문은 최근 제정 중인 광대역 방사 내성 표준 IEC 61000-4-41과 관련하여, 기존에 사용되는 내성 신호원과 새로이 도입하고자 하는 광대역 내성 신호원이 피시험 기기에 미치는 영향을 비교하고자 하였다. 비교를 위한 내성 신호원으로는 IEC 61000-4-3, 4-39, ISO 11452-1 등에서 준용하고 있는 CW, AM 신호, PM 신호 등을 사용하였으며, 광대역 내성 신호원으로는 FIR 필터가 적용된 20 MHz 대역폭의 OFDM 신호를 사용하였다. 또한, 각 신호원에 의한 영향을 비교 분석하기 위하여 기준 파라미터로 사용되는 내성 레벨을 제시하였으며, 그 결과 OFDM 신호를 사용할 때 피시험 기기의 내성 레벨이 기존에 사용되었던 신호원의 내성 레벨보다 더 낮은 것을 확인하였다.

Abstract

This study aims to compare the impact of existing signal sources of the conventional radiated immunity standard and a newly introduced broadband signal source on the equipment under test concerning the recently drafted broadband radiated immunity standard, IEC 61000-4-41. The comparison for disturbance signal sources utilized CW, AM, and PM signals adhering to IEC 61000-4-3, 4-39, and ISO 11452-1 standards. For the broadband disturbance signal source, an OFDM signal with a 20 MHz bandwidth and applied FIR filter was used. Additionally, a key parameter, 'immunity level,' was introduced to compare and analyze the impact of each signal source. The results revealed that when using the OFDM signal, the immunity level of the equipment under test was lower compared to the immunity level when using the conventional signal sources.

Key words: Radiated Immunity, OFDM, AM, PM, IEC 61000-4-41.

I. 서 론

그림 1은 최근 한국 철도 공사가 운영하는 30개 지하철에서 발생한 스크린 도어의 개폐 오동작에 대한 뉴스 기

「이 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2023R1A2C2008116).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

*(주)이엔알(E&R)

**국립전파연구원(National Radio Research Agency, RRA)

· Manuscript received December 30, 2023 ; Revised January 12, 2024 ; Accepted January 18, 2024. (ID No. 20231230-111)

· Corresponding Author: Wansoo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

“스크린 오작동 이유는? 이통사 5G 중계기 탓”

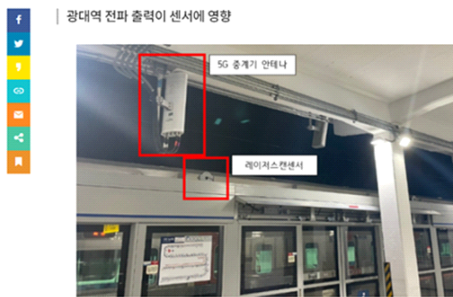


그림 1. 지하철 스크린 도어 오작동에 관한 2022년 9월 26일자 기사

Fig. 1. Subway screen door malfunction reported in news article dated september 26, 2022.

사이다. 이러한 오동작의 이유는 스크린 도어 주위에 위치해있던 5G 이동통신 중계기의 광대역 신호 영향 때문인 것으로 밝혀졌다^[1]. 이는 중계기에서 방사된 전자파가 스크린 도어 시스템에 전자파 장애(electromagnetic interference)를 유발한 것으로, 향후 이동통신 및 IoT 산업이 지속적으로 발전함에 따라 이와 유사한 사례는 더욱 심화될 것으로 예상된다.

국가 통계포털 KOSIS에 따르면 국내 이동통신 서비스 가입자 수가 그림 2와 같이 2020년 기준 140 % 까지 증가하였다^[2]. 또한, 5G/IoT 시대에서 휴대전화를 포함한 무선 기기의 밀집도는 $\sim 200,000$ devices/km²까지 증가할 것으로 예상된 바 있다^[3]. 4세대 LTE(long term evolution) 이동통신부터 한 개 채널에 다수의 사용자를 수용하고 송수신할 수 있는 데이터 용량을 증가시키기 위하여 OFDMA

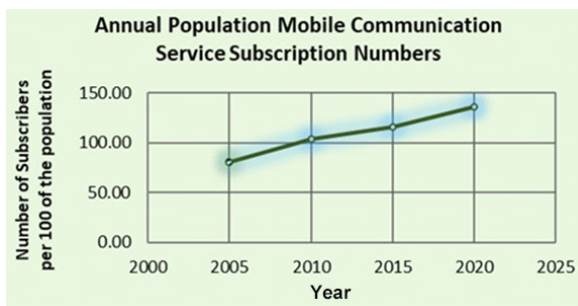


그림 2. 국내 이동통신 서비스 가입자 수, KOSIS 제공
Fig. 2. Domestic mobile communication subscribers provided by KOSIS.

(orthogonal frequency division multiple access) 방식이 채택되어 사용되고 있다. 더욱 효율적인 통신 환경을 제공하기 위하여 채널은 점차 광대역화 되며, 자유 공간상의 전자파 복잡도가 매우 높아질 것으로 보인다. 이는 지난 100년동안 지속적으로 발전해왔던 전자파 적합성(EMC, electromagnetic compatibility) 분야가 일찍이 경험하지 못했던 도전적인 상황으로 평가받고 있다. 이러한 상황 변화에 능동적으로 대처하기 위해서는 현재까지의 각종 표준 및 규제에서 사용되어 온 전자기기의 내성 기준을 면밀히 살펴볼 필요가 있다.

현재 국제 표준에 의하면 전자파 방사내성에 대한 측정 상한 주파수를 6 GHz까지로 규정하고 있으며, 18 GHz까지 측정 방법이 기술되어 있다. 전자파 내성의 경우, 피시험기기(EUT, equipment under test)가 위치하는 장소의 실제 전자파 환경을 모사하여 시험하는 것이 원칙이다^[4]. 그러나 실제로는 피시험기기 주변 전자파 환경이 역동적으로 변화하고 특히 모바일 기기의 경우 위치 자체가 변하기 때문에 방사 내성 시험에서는 관심 주파수 대역에서 주파수 별로 스위프(sweep)하면서 일정 전력을 가지는 전자파를 인가하여 피시험기기의 정상동작 여부를 확인하는 방법을 사용한다. 방사 내성 표준 IEC 61000-4-3에서는 AM(amplitude modulation) 신호원을 주로 이용하며, 근거리 방사 내성 표준 IEC 61000-4-39에서는 주파수 영역별로 AM 및 PM(pulse modulation) 신호원을 이용하도록 규정되어 있다^{[5],[6]}. 그러나 이러한 내성 신호원들이 현재의 복잡한 전자파 장애 환경을 모사할 수 있는가에 대해서는 여러 부정적인 견해들이 제시되어 왔으며^[7], 기존의 내성 시험이 가지고 있는 주파수 누락, 시험시간 장기화 등의 문제를 극복하기 위하여 광대역 신호원을 이용한 IEC-61000-4-41 내성 시험 표준이 현재 새롭게 제정 중에 있다^[8]. 따라서 본 논문에서는 이를 뒷받침하고자 기존 내성 시험 신호원과 광대역 내성 신호원을 이용한 방사 내성 시험을 진행하였다. 즉, 광대역 방사 내성 신호원과 기존의 AM, PM 시험 신호원에 대하여 대상기기의 전자파 내성 거동이 어떠한 차이를 보이는지 비교, 분석하고자 하였으며, 이를 위하여 각 신호원이 대상 기기에 미치는 영향을 비교하는 기준으로 사용되는 내성 레벨을 제시하였다.

II. 광대역 방해 신호원 발생

현재 제정중인 광대역 방사 내성 표준 IEC 61000-4-41에서는 시험신호의 대역폭을 20 MHz 및 100 MHz로 규정할 것이 논의된 바 있으며, 광대역 신호원의 대역폭이 넓어지면 같은 채널 전력을 사용하더라도 피시험 기기에 더 많은 영향을 줄 수 있다는 것이 보고된 바 있다^[8]. 본 논문에서는 20 MHz 대역폭을 가지고 있는 신호원을 사용하고자 하며, 이는 표준에서 제시하고 있는 대역폭 중에서 가장 좁은 대역의 신호에 해당한다.

OFDM 신호는 입력 데이터열을 N 개의 저속 데이터열로 분리시킨 다음 각 데이터열을 서로 다른 부반송파에 실어서 전송한다. 이때 부반송파 간 간섭을 억제하기 위하여 부반송파의 간격을 OFDM 심볼 길이의 역수로 설정하여 전송한다. OFDM 신호의 심볼은 구형과 형태를 사용하며, 주파수 영역에서 이러한 심볼은 sinc 함수로 표현된다. 이때 측대역 신호는 sinc 함수의 특성에 따라 주파수의 역수에 의해 감쇄되는 형태를 보인다^[9]. 이는 주파수 영역에서 OFDM 신호의 스펙트럼에서 대역 외 신호를 야기하며, 통신 신호의 관점에서 스펙트럼 마스크 규제를 통과하기 위해 이러한 대역 외 신호는 제한될 필요가 있다. 이러한 필요에 따라 지금까지 여러 가지의 디지털 필터링 기법이 적용되어 왔다^{[9]~[11]}. 한편, 내성 신호원으로써의 광대역 신호는 전송된 신호의 복조를 고려하지 않아도 되며 전력 스펙트럼 밀도(power spectral density) 및 대역폭 측면에서 상용 광대역 통신 신호원을 모사하면 된다. 따라서 본 논문에서는 FIR(finite impulse response) 필터를 적용한 F-OFDM(filtered OFDM) 신호를 방해 신호원으로 이용하였다.

l 번째 OFDM 블록에서 전송되는 OFDM 변조 신호는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[12].

$$s_l(t) = \sum_{k=m}^{m+M-1} s_{l,k} e^{j2\pi k \Delta f t}, 0 \leq t \leq T_s \quad (1)$$

단, T_s : 심볼 길이 (s)

$$\Delta f \left(= \frac{1}{T_s} \right): \text{부반송파 간 간격 (Hz)}$$

N : 전체 FFT 사이즈

$\{m, m+1, \dots, m+M-1\}$: 채널에 할당된 부반송파

의 범위

$s_{l,k}$: l 번째 OFDM 블록에서 k 번째 부반송파의 변조 심볼

본 연구에서는 순환 전치(cyclic prefix)를 고려하지 않으며, 샘플링된 기저대역의 OFDM 신호는 식 (2) 및 식 (3)과 같이 표현할 수 있다^[9].

$$\begin{aligned} s_l(n) &= s_l \left(n \frac{T_s}{N} \right) \\ &= \sum_{k=m}^{m+M-1} s_{l,k} e^{j2\pi k \Delta f n \frac{T_s}{N}} \\ &= \sum_{k=m}^{m+M-1} s_{l,k} e^{j \frac{2\pi k n}{N}}, \quad 0 \leq n < N \end{aligned} \quad (2)$$

$$s(n) = \sum_{l=0}^{L-1} s_l(n - l \times N) \quad (3)$$

단, L : OFDM 심볼의 개수

식 (1)~식 (3)에 기반하여, 본 연구에서 발생시킨 OFDM 신호의 파라미터 값은 표 1과 같다. 이때, 발생시킨 신호와 필터 함수를 시간영역에서 컨벌루션 형태로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으며, 주파수 영역에서는 식 (5)와 같이 곱셈 형태로 나타낼 수 있다^[10].

$$\tilde{s}(n) = s(n) * f(n) \quad (4)$$

$$\tilde{S}(f) = S(f)F(f) \quad (5)$$

단, $f(n)$: n 번째 OFDM 심볼에 적용되는 필터

$s(n)$: 시간영역에서 샘플링된 OFDM 신호

표 1. OFDM 신호 파라미터

Table 1. Parameters of OFDM.

Parameter	OFDM setting
FFT size (N)	4,000
Number of carriers (M)	1,334
Sub-carrier spacing (Δf)	15 kHz
Bandwidth	20 MHz
Modulation	QPSK
Sequence length	420 symbols
Symbol duration (T_s)	1/15 kHz=66.67 us

$\tilde{s}(n)$: 시간영역에서 필터를 통과한 F-OFDM 신호
 $F(f)$: 주파수 영역에서 필터 응답 특성
 $S(f)$: 주파수 영역에서의 OFDM 신호
 $\tilde{S}(f)$: 주파수 영역에서 필터를 통과한 F-OFDM 신호

매트랩에서는 Parks-McClellan 알고리즘을 이용하여 FIR filter를 설계하는 함수를 제공하고 있으며^[13], 그림 3과 같이 설계 파라미터를 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 표 2와 같이 파라미터를 만족하는 FIR 필터를 설계하여 신호원에 적용하였다. 이때, $f_n \left(= \frac{f}{f_s/2} \right)$ 은 정규화 주파수를 의미한다. 결과적으로 차수가 410인 FIR 필터가 설계되었으며, 그림 4는 FIR filter가 적용되기 전/후의 OFDM 신호를 나타낸다. 중심 주파수는 2.4 GHz이며 그림으로부터 필터 적용된 후 대역 외 신호가 저감된 것을 확인할 수 있다. 그리고 본 장에서 기술되었던 OFDM 신

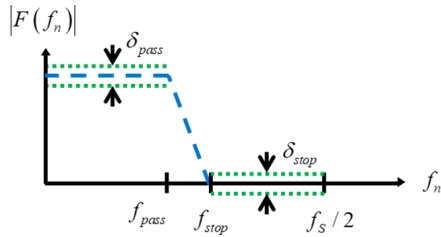


그림 3. 정규화된 주파수 영역에서의 FIR 필터의 주파수 응답
 Fig. 3. Frequency response of FIR filter in normalized frequency domain.

표 2. FIR 필터 설계 파라미터
 Table 2. FIR filter design parameter.

Parameter	Meaning	Setting
$f_s (=N, \text{FFT size})$	Sampling frequency	4,000
$f_{pass} (= \frac{M}{2}, \text{half of sub-carriers})$	Normalized passband frequency	667
f_{stop}	Normalized stopband frequency	707
δ_{pass}	Pass-band ripple	0.001 dB
δ_{stop}	Stop-band ripple	60 dB

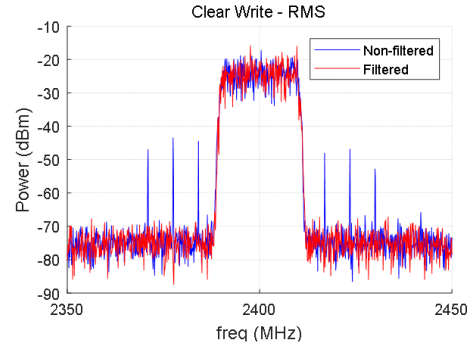


그림 4. FIR 필터 적용 전/후의 OFDM 신호
 Fig. 4. Generated OFDM signal with and without FIR filter.

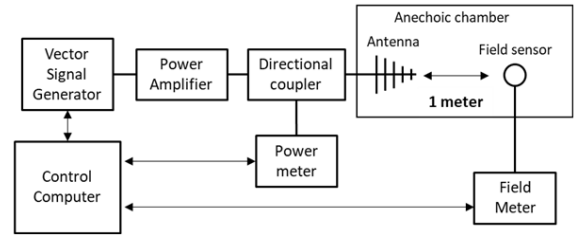


그림 5. 간략히 나타낸 광대역 방사 내성 시험 시스템
 Fig. 5. Schematic of broadband RS test system.

호 및 FIR 필터는 모두 그림 5에서의 벡터 신호 발생기 (VSG, vector signal generator)에서 구현되었다.

III. 균일장 영역 조건 확보

광대역 방사 내성도 방사 내성 시험의 일종이므로 IEC 61000-4-41에서는 몇몇 시험장비를 제외하고 대부분의 시험 설비가 IEC 61000-4-3의 성능 규정을 충족하는 설비를 따르도록 기본 방침이 결정되었으며, 시험 레벨 교정을 위한 레벨 세팅 절차 또한 IEC 61000-4-3과 같이 무변조 연속파(CW, continuous wave)를 이용하여 실시한다. 본 논문에서 진행한 시험은 국립전파연구원(RRA, National Radio Research Agency)의 3 m 무반향실에서 진행하였으며, 시험 환경을 그림 5와 같이 간략히 나타낼 수 있다. 벡터 신호 발생기는 Rohde&Schwarz사의 SMCV100B를 사용하였으며, 전력 증폭기(PA, power amplifier)는 AR사의 50S1G4A를 사용하였다. 또한, 안테나는 Schwarzbeck사의 BBHA 9120E로 혼 안테나를 이용하였다. 벡터 신호 발생기에서 발생된 OFDM 신호가 전력 증폭기를 통과하

여 안테나를 통해 무반향실 내 공간에 방사되며, 양방향 결합기를 이용하여 전방 전력 및 반사 전력을 측정하였다. 벡터 신호 발생기는 컴퓨터와 연결되어 제어할 수 있으며, 제어실 내에서 전력 계측기를 통해 전방 전력 및 반사 전력을 확인할 수 있다.

자유공간을 통한 무선 링크의 송수신 전력 관계를 표현하는 Friis 공식은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = P_t + G_t + G_r + 20\log\left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right) \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

이때 P_t 는 전송된 전력, P_r 은 수신된 전력, G_t 는 송신 안테나 이득, G_r 은 수신 안테나 이득, R 은 송수신 안테나 사이의 거리를 의미한다. 식 (6)의 마지막 항에서 거리가 수신 영향에 미치는 전력을 비교하면, $R=3$ m인 경우 $20\log(1/3)=-9.5424$ dB이며, $R=1$ m인 경우 $20\log(1)=0$ dB이다. 즉, 피시험기와 안테나 사이의 거리가 3 m일 때와 1 m일 때 수신단에 도달하는 전력은 약 10 dB 차이가 발생한다. IEC 61000-4-3의 시험 환경에서는 안테나와 피시험기의 거리로 3 m를 선호하며, 최소 1 m의 거리에서 시험하도록 규정되어 있으며, 본 연구에서 수행된 시험에서는 피시험기에 가능한 높은 전력을 인가하기 위해 최소 거리인 1 m에서 시험을 진행하였다. 피시험기로는 DELL사의 U2415B LCD monitor를 이용하였다.

IEC 61000-4-3에서는 80 MHz부터 6 GHz까지의 시험 주파수 영역을 제시하고 있다^[3]. 이때 대부분의 스마트폰 및 태블릿 PC 등이 800 MHz~6 GHz의 통신 주파수를 사용하는 것을 고려하여, 해당 대역에서 20 MHz OFDM 신호를 이용해 오동작이 발생하는 주파수를 찾았다. 그 결과 2.3 GHz~2.5 GHz의 주파수 범위에서 주로 오동작이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 그 중 가장 낮은 내성 레벨이 99.6 V/m임을 확인할 수 있었다. 내성 레벨에 대한 설명은 IV에 후술하였다. 그에 따라 균일장 영역 교정 또한 해당 주파수 대역에서 99.6 V/m에 맞추어 이루어졌으며, 주파수 이동 간격은 2.3 GHz에서 10 MHz(ex. 2.3 GHz → 2.31 GHz) 씩 주파수를 옮겨가며 교정을 수행하였다. 이는 기존에 시험시간의 단축을 위해 실시하는 주파수 스윙 간격이 1 %(ex. 2.3 GHz → 2.323 GHz) 인 것에 비해 더 좁은 간격임을 알 수 있다.

균일장 영역 시험은 기본적으로 피시험기가 존재하게 될 위치에 전기장 프로브를 위치시켜 수행한다. IEC 61000-4-3의 6.3.1에는 균일장 영역(UFA, Uniform Field Area)가 피시험기의 전체 면적을 조명할 수 있는 경우 균일장 영역의 크기는 최소 0.5 m×0.5 m까지 가능하며, 이러한 경우 균일장 영역의 중심에 5번째 지점을 두어 전기장 세기를 측정하도록 명시되어있다. 본 논문에서 사용된 BBHA 9120E 안테나의 경우, 수 GHz 대역에서 지향성으로 인해 가로세로 0.5 m×0.5 m보다 넓은 범위에 대해 균일장 영역을 형성하기 어렵다는 한계가 있다^[14]. 모니터의 화면은 가로 길이가 51.84 cm, 세로 길이가 32.4 cm, 모니터 상단에서 지지대 하단까지의 거리는 47.5 cm이며, 피시험 모니터의 가로 길이가 0.5 m보다 넓다. 따라서 IEC 61000-4-3의 부속서 H의 피시험기의 사이즈가 균일장 영역 대비 큰 경우를 참조하여, 안테나 위치를 조정하며 2번에 걸쳐 균일장 영역을 확보한 후 내성 시험을

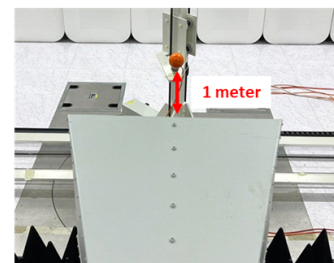
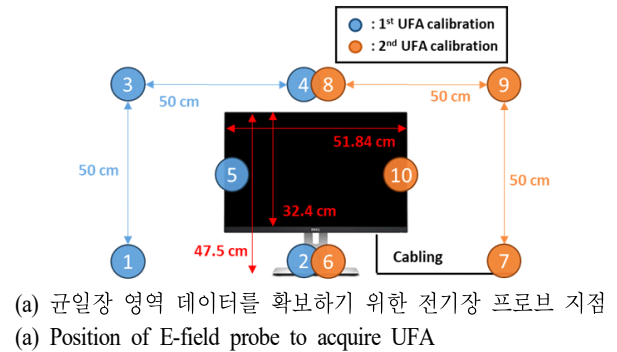


그림 6. 안테나 위치 조정에 따른 전기장 프로브 위치
Fig. 6. E-field probe position by antenna position.

수행하였다. 균일장 영역 교정 지점은 그림 6(a)와 같이 나타낼 수 있다. 2번의 교정을 수행하였으며, 첫 번째 교정은 1~5번 지점, 2번째 교정은 6~10번 지점에 대하여 수행하였다. 4번과 8번, 2번과 6번은 동일한 지점이나 편의를 위하여 별도의 번호를 부여하였다. 균일장 영역의 하단은 시험에 사용될 비전도성 지지대의 윗부분에 해당하는 80 cm 높이에 위치하며, 추후 시험에는 해당 높이에 모니터의 전원선 및 HDMI 케이블이 위치하게 된다.

이때 안테나 개구면의 중심위치가 각각 5번과 10번 지점에서 균일장 영역 평면에 직교하는 방향으로 1 m 떨어진 지점이 되도록 안테나의 위치를 조정하였다. 이는 그림 6(b)와 같이 나타낼 수 있다. 그림 7은 첫 번째 균일장 영역에 대한 교정 데이터, 그림 8은 두 번째 균일장 영역에 대한 교정 데이터를 나타낸다.

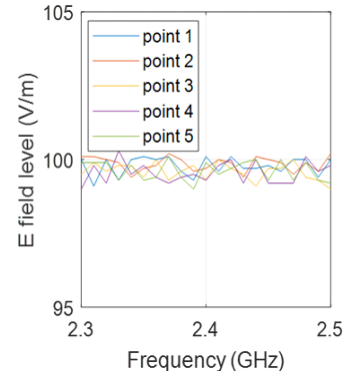
전기장의 목표 레벨은 99.6 V/m로 설정하였으며, 그림 7(a)와 그림 8(a)는 모든 지점에서 이를 달성하였음을 나타낸다. 또한, 그림 7(b)와 그림 8(b)는 목표 전기장 레벨을 달성했을 때 전기장 프로브의 위치별 전방 전력이다. 이때 P_{Fwd} 는 전방 전력을 의미한다. 5번과 10번 지점에서 목표 전기장을 달성하기 위한 전방 전력이 상대적으로 낮게 분포하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 안테나의 3 차원 이득이 개구면 중심에서 방사하는 방향으로 가장 높게 형성되기 때문이다. 그림 7(c)와 그림 8(c)는 전방 전력의 최대값과 최소값의 차이이며, 전 주파수 영역에서 6 dB 이내로 형성되는 것을 확인할 수 있다.

그림 9(a) 및 그림 9(b)는 각각 5번과 10번 지점에서 측정된 전력 및 전기장 데이터이다. P_{siggen} 은 신호 발생기의 전력, P_{Rfl} 는 안테나에 의한 반사 전력이다. 두 지점 모두 목표 전기장 레벨을 달성하기 위해 신호 발생기에서 전력 레벨을 많이 조정하지 않아도 됨을 보인다. 측정된 반사 전력의 변화는 주파수 영역에서 안테나의 정재파비 (SWR, standing wave ratio)의 변화에 기인한다.

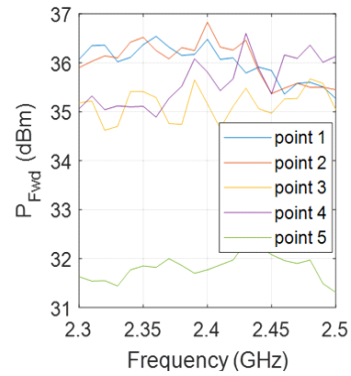
IV. 시험 결과

내성 시험은 II의 OFDM 신호와 표 3에 나타난 3가지 신호원을 이용하여 수행하였다.

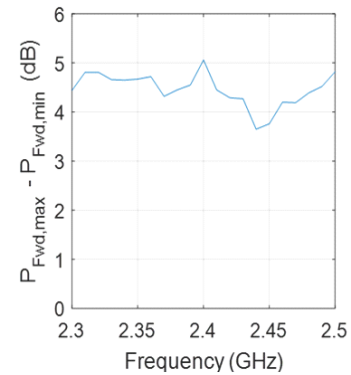
시험은 각각의 주파수에서, 피시험기에 오동작이 발



(a) 전기장 프로브 위치별 목표 전기장 달성
(a) Target E-field level achievement for each E-field probe position



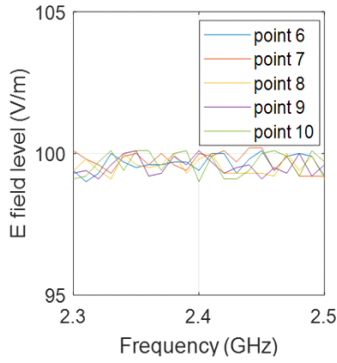
(b) 목표 전기장 달성 시 전력 계측기에 나타난 전방전력
(b) P_{Fwd} displayed on power meter when target field level acheived



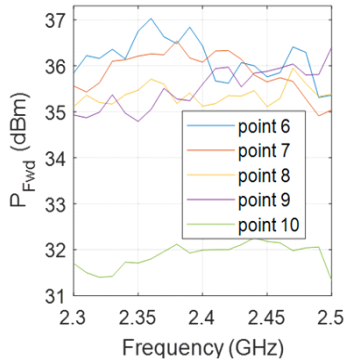
(c) 전방 전력 최대/최소값 간의 차
(c) Difference between max./min. level of P_{Fwd}

그림 7. 첫 번째 균일장 영역 교정에서 프로브 위치별 전기장 레벨 및 전방 전력

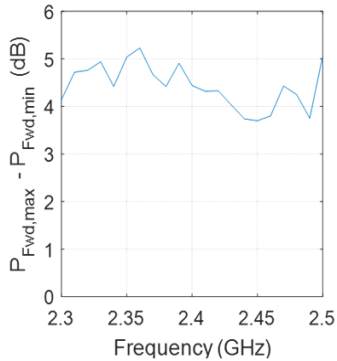
Fig. 7. E-field level and P_{Fwd} by position of probe in 1st UFA calibration.



(a) 전기장 프로브 위치별 목표 전기장 달성
(a) Target E-field level achievement for each E-field probe position

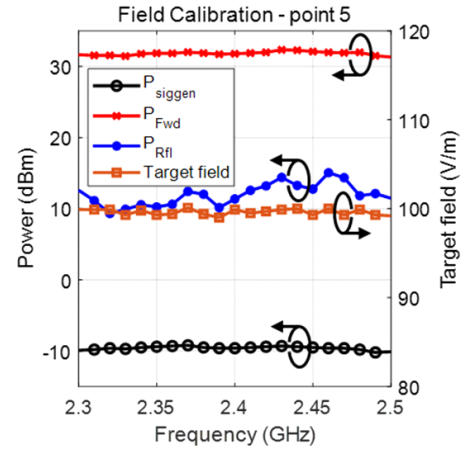


(b) 목표 전기장 달성 시 전력 계측기에 나타난 전방전력
(b) P_{Fwd} displayed on power meter when target field level achieved

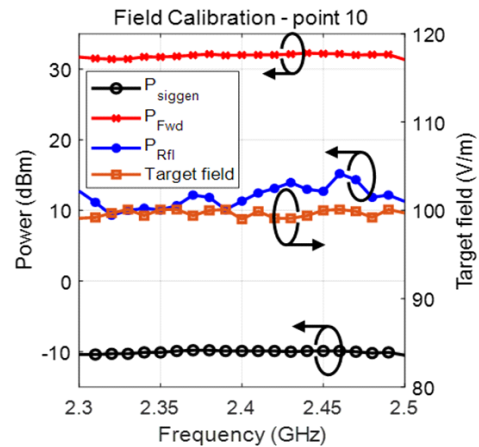


(c) 전방 전력 최댓/최솟값 간의 차
(c) Difference between max./min. level of P_{Fwd}

그림 8. 두 번째 균일장 영역 교정에서 프로브 위치별 전기장 레벨 및 전방 전력
Fig. 8. E-field level and P_{Fwd} by position of probe in 2nd UFA calibration.



(a) 5번 지점에서 목표 전기장 달성시 전방/반사 전력 및 신호 발생기의 전력
(a) P_{Fwd}/P_{Rfl} and P_{siggen} when target field level achieved in position No. 5



(b) 10번 지점에서 목표 전기장 달성시 전방/반사 전력 및 신호 발생기의 전력
(b) P_{Fwd}/P_{Rfl} and P_{siggen} when target field level achieved in position No. 10

그림 9. 5번과 10번 지점에서의 각종 전력 및 전기장 기록
Fig. 9. Various power and E-field records at points 5 and 10.

생하지 않을 만큼 신호 발생기의 전력을 충분히 낮게 조절된 상태에서 신호 발생기의 전력을 1 dB 단위로 증가시키며 수행하였다. 이때 표 4에서 확인할 수 있듯, 전력 증폭기의 이득은 약 47 dB로 설정되어 있으며, 증폭기의 P_{1dB} 는 40 W이다. 신호 발생기의 전력이 -1 dBm일 경우 증폭기의 출력 전력은 46 dBm으로, 이를 환산하면 39.81

표 3. 내성 신호원 특성

Table 3. Specification of test signals.

1. CW (Carrier frequency, 2.3 GHz~2.5 GHz, 10 MHz interval)	
2. AM	
Modulation frequency	1 kHz
Modulation depth	80 %
3. PM	
Repetition period	4.6 ms(=217 Hz)
Duty cycle	50 %

표 4. 50S1G4A 전력 증폭기 사양

Table 4. Specification of 50S1G4A.

Frequency response		0.8~4.2 GHz
Rate power output		50 watts minimum
Power output @ 3 dB compression	Nominal	70 watts
	Minimum	50 watts
Power output @ 1 dB compression	Nominal	60 watts
	Minimum	40 watts
Flatness	Typical	± 1.5 dB
	Maximum	± 2.0 dB
Gain (at maximum setting)		47 dB minimum
Input impedance		50 ohm, VSWR 2:1 max
Output impedance		50 ohm, Nominal

W이다. 이러한 점을 고려하여 벡터 신호 발생기의 전력이 -1 dBm를 넘지 않도록 하였으며, 이를 통과 전력 레벨로 정의하였다.

각 신호에 대하여 신호 발생기의 전력을 동일하게 설정하여 내성 신호를 공간상에 방사할 경우 신호의 특성에 따라 전기장의 세기가 달라지며, 챔버 내에서 사용되는 전기장 프로브는 CW의 전기장 세기를 측정하도록 특화되어 있다. 따라서, 각 신호원의 영향을 비교하기 위해 기준 파라미터로 사용되는 ‘내성 레벨(Immunity level)’을 제시하였으며^[15], 이는 피시험기기에 오동작이 발생할 때 신호 발생기의 전력 레벨을 유지한 상태에서 변조를 해제하였을 때의 전기장 세기를 의미한다. 즉, 내성 레벨은 피시험기기의 오동작이 발생한 최소의 전기장 세기를 의미하며, 특정 신호원에 대한 내성 레벨 낮을수록 피시험

기기에 미치는 영향이 강함을 의미한다^[15]. 내성 시험은 그림 10과 같이 수행하였다. IEC 61000-4-3의 7.4에 따르면, 균일장 영역에 직교하는 케이블은 전자기장에 의한 영향을 거의 받지 않으며, 각 케이블은 적어도 피시험기의 한 방향에서는 균일장 영역 내부에 위치하여 전자기장에 노출 시킬 것을 명시하고 있다. 본 논문의 시험은 신호원에 따른 피시험기기의 내성 특성을 비교하는 것이므로 가능한 악조건을 형성하고자 케이블은 균일장 영역 내부에 위치시켰다.

모니터와 같은 디스플레이 내성 시험의 경우 화면상의 오동작을 보다 쉽게 관측할 수 있도록 주로 컬러바 화면을 이용하여 시험을 진행한다. 시험 간 주로 발생한 오동작은 화면 블랙 스크린 현상이며, 오동작 여부는 무반향실 내에 설치된 모니터링 카메라를 이용하여 제어실에서 그림 11과 같이 확인할 수 있다. 내성 시험은 안테나 개구면의 중심을 5번 지점과 10번 지점과 일치시켜 수행하였으나, 실제로 오동작은 10번 지점에서만 발생하였다. 10

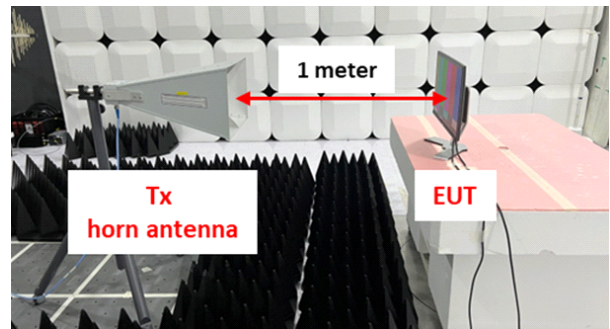
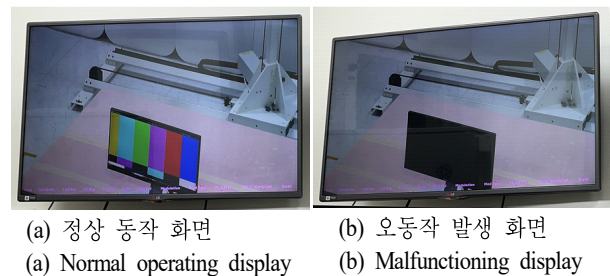


그림 10. 챔버 내부의 시험 셋업

Fig. 10. Testing setup in the chamber.



(a) 정상 동작 화면

(a) Normal operating display

(b) 오동작 발생 화면

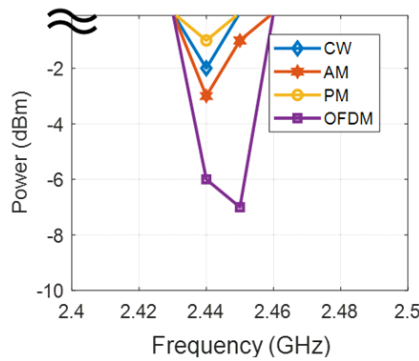
(b) Malfunctioning display

그림 11. 제어실에서 바라본 피시험 기기의 전경

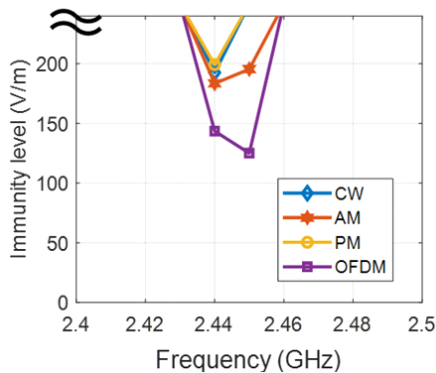
Fig. 11. Malfunction observation in control room.

번 지점에서의 내성 레벨은 그림 12와 같이 나타났다. 그림 12(a)는 피시험기기에 오동작이 발생했을 때 신호 발생기의 전력을 기록한 것이며, 그림 12(b)는 앞서 설명한 바와 같이 동일 전력에서 변조를 해제하여 무변조파 상태일 때의 전기장 세기를 관측한 내성 레벨이다. 그림 12(a)와 그림 12(b)의 경향이 유사하게 나타난 것을 확인할 수 있다. CW와 PM 신호의 경우, 신호의 중심 주파수가 2.44 GHz일 때 오동작이 발생하며 AM 및 OFDM 신호는 2.44, 2.45 GHz의 중심 주파수에서 에러가 발생하는 것을 확인하였다.

내성 레벨은 OFDM-AM-CW-PM 순서대로 낮음을 확인할 수 있으며, 에러가 발생한 모든 주파수에서 OFDM 신호에 대한 내성 레벨이 더 낮은 것을 확인하였다. 즉,



(a) 피시험기기에 오동작이 발생했을 때의 신호 발생기 전력
(a) P_{siggen} when malfunctioning occurred in EUT



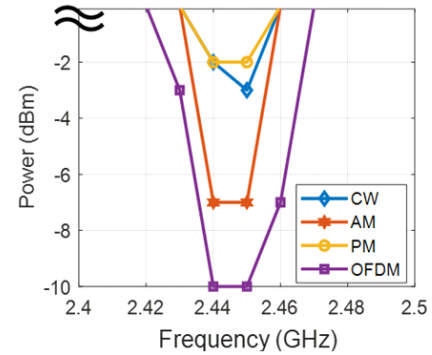
(b) 피시험기기에 오동작이 발생했을 때의 내성 레벨
(b) Immunity level when malfunctioning occurred in EUT

그림 12. 10번 지점에서의 시험 결과

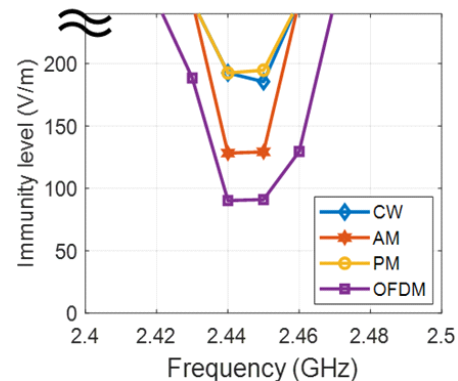
Fig. 12. Test result at point 10.

OFDM 신호를 이용할 때 신호 발생기의 전력이 타 신호원에 비해 상대적으로 낮아도 피시험기기에 강한 영향을 미칠 수 있는 것이 확인되었다.

이 외에도 안테나 개구면의 중심을 그림 6(a)의 5번과 10번 지점의 중간에 두어 내성 시험을 반복 수행하였으며, 그 결과는 그림 13과 같다. 안테나의 빔 폭을 고려할 때, 그림 12의 결과보다 모니터의 중심 및 화면 전반에 더 강한 전력이 전달되고 있을 것으로 예상할 수 있다. 이에 따라 전반적으로 10번 지점에서의 결과보다 더 낮은 내성 레벨을 보이며, 각 신호원에 의한 오동작 또한 더 많은 주파수에서 보이는 것을 확인할 수 있다. 2.44, 2.45 GHz의 중심 주파수에서 CW와 PM 신호, AM 신호에 의한 오



(a) 피시험기기에 오동작이 발생했을 때 신호 발생기의 전력
(a) P_{siggen} when malfunctioning occurred in EUT



(b) 피시험기기에 오동작이 발생했을 때 신호 발생기의 내성 레벨
(b) Immunity level when malfunctioning occurred in EUT

그림 13. 5번과 10번의 중간지점에서의 시험 결과

Fig. 13. Test result at the midpoint between point 5 and 10.

동작을 관측할 수 있었으며, OFDM 신호는 중심 주파수가 2.43, 2.44, 2.45, 2.46 GHz일 때 오동작이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이로부터 안테나와 피시험기기의 배치가 내성 시험에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그림 13은 그림 12와 마찬가지로 OFDM-AM-CW-PM 순으로 내성 레벨이 낮은 것을 확인할 수 있으며, 그림 12의 결과 대비 오동작 발생 주파수에서의 내성 레벨이 전반적으로 낮은 것을 확인할 수 있다. 따라서 안테나와 피시험기기의 배치가 전자기 내성에 영향을 미치며, 동시에 그림 12과 13의 결과로부터 OFDM 신호가 피시험기에 더욱 치명적인 영향을 미치고 있음을 유추할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 현재까지 대부분의 내성 시험 표준에서 사용하고 있는 내성 신호원과 광대역 내성 신호원이 대상 기기에 미치는 영향을 비교하기 위한 시험을 수행하고 그에 대한 결과를 작성하였다. 광대역 신호원을 발생시키기 위해 Rohde&Schwarz사의 벡터 신호 발생기를 사용하였으며, 20 MHz 대역폭을 가진 OFDM 신호를 발생시켰다. 이때, 대역 외 신호 발생을 억제하기 위하여 Matlab를 이용한 FIR 필터를 설계하여 신호에 적용하였다. 또한, 피시험기에 더욱 높은 전력을 전달하기 위하여 안테나와 피시험기기의 간격을 1 m로 설정하였으며, 그에 따른 균일장 영역 교정 절차를 거쳐 내성 시험을 수행하였다. 실험 결과, 2.4 GHz~2.5 GHz의 주파수 범위의 LCD 모니터에 대한 내성 시험에서, 본 논문에서 사용된 내성 신호원 중 OFDM 신호가 가장 치명적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 광대역 장애 신호의 대역폭이 넓을수록 시험 대상 기기에 큰 간섭을 유발한 점과, IEC 61000-4-41에서 논의되고 있는 광대역 내성 신호의 대역폭이 20 MHz와 100 MHz인 점을 상정하면, 광대역 내성 신호원으로써 가장 완화된 신호임에도 불구하고 기존의 내성 신호원보다 높은 영향을 미치는 것을 짐작할 수 있다.

해당 결과는 향후 본 연구진이 지속적으로 수행할 광대역 장애 신호의 유기 매커니즘과 관련하여 유용한 기반 데이터로 사용할 수 있을 것으로 기대되며, 추후 광대

역 방사 내성 표준에 기여할 수 있는 연구 성과로 이어지도록 노력 하고자한다.

References

- [1] Ftoday, "Why is the screen malfunctioning? It's the fault of the mobile carrier's 5G repeater," 2022. Available: <https://www.ftoday.co.kr/news/articleView.html?idxno=241795>
- [2] Korean Statistical Information Service(KOSIS), "1. Number of mobile phone subscribers," 2023. Available: https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ZGAE21
- [3] K. Wiklundh, P. Stenumgaard, "EMC challenges for the era of massive internet of things," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 65-74, Jul. 2019.
- [4] S. Baligar, F. Lawrence, "The future of immunity testing," in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, Singapore, 2018, pp. 135-138.
- [5] *Electromagnetic Compatibility(EMC), Part 4-3: Testing and Measurement Techniques - Radiated, Radio-Frequency, Electromagnetic Field Immunity Test*, IEC 61000-4-3 Ed. 4.0, Apr. 2008.
- [6] *Testing and Measurement Techniques - Radiated Fields in Close Proximity Immunity Test*, IEC 61000-4-39 Ed.1.0, Jul. 2015.
- [7] H. S. Keum, "Design and evaluation of broadband radiated immunity test system using OFDM signal", Ph.D. dissertation, Chungbuk University, Cheongju, 2015.
- [8] H. S. Keum, B. S. Myung, "Progress in broadband radiated immunity test standardization", *The Proceeding of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 1, pp. 69-77, Jan. 2023.
- [9] J. Abdoli, M. Jia, and J. Ma, "Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems," in *2015 IEEE*

16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications(SPAWC), Stockholm, Jun.-Jul. 2015, pp. 66-70.

- [10] A. Thakre, "Optimal filter choice for filtered OFDM," in *2019 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology(ICECA)*, Coimbatore, Jun. 2019, pp. 1035-1039.
- [11] X. Cheng, Y. He, B. Ge, and C. He, "A filtered OFDM using FIR filter based on window function method," in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference(VTC Spring)*, Nanjing, May 2016, pp. 1-5.
- [12] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Ye Li, "OFDM and its wireless applications: A survey," *IEEE*

Transactions on Vehicular Technology, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.

- [13] Mathworks, "Firpm," 2006. Available: <https://www.mathworks.com/help/signal/ref/firpm.html>
- [14] Schwarzbeck, "BBHA 9120 E doppelsteg-breitband-hornantenne." Available: <https://schwarzbeck.de/Datenblatt/ri9120e.pdf>
- [15] N. Nakamura, Y. Okugawa, Y. Hiroshima, and K. Takaya, "Study on test signals for radiated immunity test in close proximity to equipment," in *2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Wroclaw, Sep. 2016, pp. 140-143.

최 경 루 [성균관대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3649-0000>



2021년 2월: 수원대학교 전자공학과 (공학사)
 2023년 2월: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 (공학석사)
 2023년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 박사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, SI/PI, EMS

권 태 욱 [성균관대학교/인턴]

<https://orcid.org/0009-0003-1971-3991>



2022년 2월: 한서대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2023년 9월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 인턴
 [주 관심분야] EMI/EMC, SI/PI

홍 영 기 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9922-6207>



2022년 2월: 수원대학교 전자공학과 (공학사)
 2022년 2월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정
 [주 관심분야] EMI/EMC, SI/PI

금 홍 식 [이앤알/연구소장]

<https://orcid.org/0000-0002-1864-6331>



1992년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2015년 8월: 충북대학교 전자공학과 (공학박사)
 2023년 2월~현재: (주)이앤알 전자파안전

연구소장

[주 관심분야] 전자파 기술기준, EMC 표준, 전자파 SE

박 세 은 [국립전파연구원/주무관]

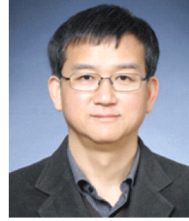
<https://orcid.org/0009-0002-2673-1250>



1993년 1월: 부천대학교 섬유과 (공학사)
2005년 8월~현재: 국립전파연구원 전파
환경안전과 주무관
[주 관심분야] RF, EMC

나 완 수 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0315-3294>



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학
사)
1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학
석사)
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학
박사)

1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator

1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원

1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수

[주 관심분야] EMC, SI/PI, EMS