

스마트폰 기본 동작 모드에 따른 저주파 대역 누설 전자파 신호 특성 분석

이 영 준[°], 박 희 선^{*}, 권 영 현^{*}, 이 재 기^{**}, 최 지 은^{*}, 조 상 우^{*}

Low-Frequency Electromagnetic Leakage Signal Analysis According to Fundamental Operations of Smartphones

Young-Jun Lee[°], Heesun Park^{*}, YoungHyouon Kwon^{*}, Jaeki Lee^{**},
 Ji-Eun Choi^{*}, Sangwoo Cho^{*}

요 약

본 논문에서는 스마트폰의 저주파 대역 누설 전자파가 미치는 악영향을 분석하기 위해 스마트폰 모델별로 기본 동작에 따라 누설되는 30 MHz 이하의 누설 전자파 신호의 스펙트럼 특성 및 방사 패턴을 분석하였다. 사용자와의 직접적인 인터페이스를 담당하는 스마트폰의 입출력 센서 모듈(터치스크린, 카메라, 마이크 및 스피커 모듈)을 활성화시키는 4가지 기본 동작 모드에 의해 누설되는 전자파 신호를 상용 Near-Field 마그네틱 프로브를 통해 1cm의 격자 간격으로 정밀하게 측정하였다. 측정된 누설 전자파 신호를 분석한 결과, 스마트폰의 모델 및 동작 모드별로 누설되는 저주파 대역 전자파는 특이한 피크(Peak) 또는 하모닉(Harmonic) 피크 성분을 보이며, 동작 모드에 따라 각각의 입출력 센서 모듈이 활성화될 경우 해당 센서 모듈 및 메인보드 상의 AP(Application Processor), 메모리 주위로 상대적으로 강한 저주파 대역의 전자파가 누설되는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Electromagnetic interference(EMI), Electromagnetic(EM) leakage analysis, Smartphone EM Leakage, Smartphone I/O sensor modules, Data acquisition system

ABSTRACT

This paper presents the spectral analysis and radiation pattern of low-frequency electromagnetic(EM) leakage signals according to the fundamental operations of smartphones. The EM leakage signals generated by the activation of four I/O sensor modules such as a touch-screen, a camera, a microphone and a speaker are captured by the commercial near-field magnetic probe with 1cm spatial resolution. The analysis results show that the leakage of the EM wave occurs strongly around the activated I/O sensor modules, AP(Application Processor) and memory modules. Also, the distinguishable frequency characteristic is shown in each spectrum of EM leakage signals.

[°] First and Corresponding Author : The Attached Institute of Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI), lhyjlee@nsr.re.kr, 정희원

^{*} The Attached Institute of Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI)

^{**} The Attached Institute of Electronics and Telecommunications Research Institute(ETRI), jklee@nsr.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2016-05-084, Received May 3, 2016; Revised June 28, 2016; Accepted August 4, 2016

I. 서 론

스마트폰은 기존 셀룰러폰의 통화 기능에 고화질의 카메라, 터치스크린, 인터넷 연결 기능 등이 추가된 소형 휴대용 단말기로서, 다양한 편의 기능을 제공하여 우리의 삶을 보다 편리하게 만들어가고 있다. 이러한 편의 기능들을 제공하기 위해 스마트폰에는 GPS(Global Positioning System), 자이로스코프 등 20가지가 넘는 다양한 디지털 IC 모듈들이 매우 좁은 공간에 집약되어 있으며, 각 IC 모듈이 동작할 때 해당 모듈 주위로 전자파가 누설된다. 이러한 누설 전자파는 서로 다른 IC 소자에 영향을 주는 EMI(Electro-Magnetic Interference) 잡음원 및 유기 물체의 온도를 상승시키는 열 발생원으로 작용한다. 실제로 디지털 클럭 신호가 누설되어 WiFi 모듈과 같은 통신 모듈에 오동작을 야기하거나 신호의 완결성(SI: Signal Integrity)에 영향을 주어 제품의 제조단가를 상승시키기도 하고, 사용자에게 전자기적인 영향을 미쳐 체온상승 및 불쾌감을 야기하기도 한다^{[1][7]}. 따라서 각 스마트폰 제조사들은 이러한 원치 않은 전자파 누설을 최소화하기 위해 노력하고 있다.

그러나 이러한 스마트폰 누설 전자파 관련 연구들은 주로 수백 MHz 이상의 고주파 대역에서 수행되고 있어 저주파 대역에서의 누설 전자파에 의한 문제점을 정확히 파악하기가 어렵다. EMI의 경우, 저주파 대역 누설 전자파는 스마트폰 고도화에 따른 높은 PCB 집적도로 인해 저주파 클럭으로 동작하는 디지털 소자들의 잡음원으로 작용할 수 있다. 또한 스마트폰 전자파의 인체 유해성을 판단하는 전자파흡수율(SAR: Specific Absorption Rate) 관점에서 보면 각 모듈에 전원 공급에 의한 저주파 잡음과 디지털 IC 소자들이 사용하는 기준 클럭 및 데이터 클럭으로 인해 누설되는 저주파 전자파 성분이 전체 전자파흡수율 측정값에 차지하는 비율이 상당할 것이며, 동작 모드에 따라 스마트폰의 특정 영역에 집중되어 나타날 것으로 판단된다. 본 논문은 이러한 저주파 대역 누설 전자파에 의한 영향 분석의 기초 연구로서 스마트폰 기본 동작 시 발생하는 누설 전자파를 분석하여 각 동작 모드에 따른 저주파 대역 누설 전자파의 전력 분포 및 방사 패턴에 대해 분석한다.

분석 대상으로는 세계적인 스마트폰 제조사인 애플사와 삼성전자의 플래그쉽 모델들을 선정하였으며, 분석 동작 모드는 사용자와 직접적인 인터페이스를 담당하는 4개의 입출력 모듈(카메라, 터치스크린, 마이크 및 스피커)을 활성화시키는 어플리케이션의 실

행으로 정의하였다. 각 입출력 센서 모듈의 동작에 따른 누설 전자파 신호 분석 결과, 각 제조사 스마트폰의 모델 및 동작 모드별로 누설되는 전자파의 주파수 성분이 상이한 것을 관찰할 수 있다. 뿐만 아니라 해당 제조사들의 누설 전자파 차폐 노력에도 불구하고 동작 모드에 따라 터치스크린, 카메라 모듈, 스피커 등의 입출력 관련 모듈이나 AP, 메모리 등과 같은 상대적으로 전력 소모가 매우 큰 IC부품 주위에서 대기 모드 대비 상대적으로 큰 세기의 저주파 대역 전자파가 누설되는 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 누설 전자파의 방사 패턴과 밀접한 관련이 있는 스마트폰의 내부 구조에 대해 살펴보고, III장에서는 누설 전자파 측정에 사용된 측정 대상 및 동작 모드를 정의하고 구현된 스마트폰 누설 전자파 측정 시스템에 대해 알아본다. IV장에서 동작 모드에 따른 스마트폰의 저주파 대역 누설 전자파의 방사 패턴 및 스펙트럼 분석 결과를 제시하고, 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 스마트폰 내부 구조 분석

일반적으로 스마트폰의 내부 구조는 그림 1과 같이 크게 메인보드와 입출력 모듈, 전원 제공용 배터리 및 외부 기구물 등으로 구성된다. 메인보드에는 스마트폰의 두뇌를 담당하는 AP, 오디오 코덱, 메모리, 통신 관련 IC 및 GPS를 비롯한 각종 센서 IC들이 설치되어 있으며, 제조사에 따라 각 소자에서 누설되는 전자파를 차단하기 위해 알루미늄 차폐 캔을 설치하거나 전자파 차단 도료를 도포하기도 한다. 사용자와 인터페이스를 담당하는 입출력 모듈은 다시 터치스크린, 카메라 모듈, 스피커 모듈, 마이크 모듈, 외부 물리 버튼 등으로 세부 구분되며, 각 모듈들은 fPCB(flexible

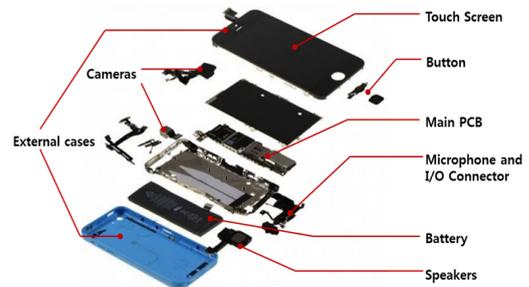


그림 1. 스마트폰 내부 구조: iPhone 5C 예시[8]
Fig. 1. Internal structure of smartphones: iPhone 5C case[8]

PCB) 형태의 커넥터를 통해 메인보드와 연결된다. 외부 기구물은 스마트폰의 외형을 결정하고 각 회로를 보호하는 역할을 수행한다.

스마트폰을 구성하는 다양한 IC 모듈중에서도 가장 큰 전자파를 누설하는 모듈은 AP/메모리 및 외부에 노출되어 있는 카메라, 오디오 관련 입출력 센서 모듈이며, 주요 전자파 누설 위치는 해당 모듈의 주위나 신호가 전달되는 메인 PCB상의 선로 또는 노출되어 있는 fPCB이다. 애플사의 경우 AP 및 주요 소자들에 차폐 캔을 각각 적용하였고 다시 메인보드 레벨에서 차폐 캔을 씌어 누설 전자파를 원천 차단하고자 하였다. 주 카메라 모듈인 후면 카메라 모듈은 독립적인 형태로 구성되어 fPCB 커넥터를 통해 메인보드와 연결되어 있으며, 애플사의 아이폰 시리즈의 경우 스마트폰 후면 좌상단에 위치하고 삼성전자의 갤럭시 시리즈는 대부분 후면 중앙 상단에 위치한다. 오디오 입출력 관련 모듈은 세부적으로 오디오 코덱, 마이크 및 스피커로 구분되는데 오디오 코덱은 일반적으로 메인보드 PCB상에 위치하고 있다. 스마트폰의 마이크 모듈은 잡음 제거 등의 목적으로 2개가 존재하며, 후면 카메라 모듈 주위와 스마트폰 하단에 위치하는 것이 일반적이다. 스피커 모듈은 스마트폰 모델별로 그 위치가 상이한데 애플사의 아이폰 시리즈에서는 하단부 전원 커넥터 옆에 위치하며, 삼성전자의 갤럭시 시리즈는 모델에 따라 뒷면의 상단 또는 하단에 위치한다.

이러한 스마트폰 내부 구조 분석을 통해 입출력 센서 모듈의 동작 시 발생하는 누설 전자파의 패턴을 예상해볼 수 있다. 예를 들어, 카메라 모듈을 사용하는 촬영 또는 녹화 관련 어플리케이션이 수행될 경우 카메라 모듈 및 이를 처리하는 AP등이 활성화되고 이로 인해 관련 모듈 주위로 전자파 누설 정도가 증가하게 될 것이라는 것이 쉽게 예측 가능하다. 마찬가지로 마이크에 음성이 입력되거나 스피커를 통해 음원이 재

생되는 경우, 오디오 입출력 관련 모듈들이 활성화되고 해당 모듈의 위치에서 전자파가 누설될 것을 예상할 수 있다.

III. 스마트폰 누설 전자파 측정 시험 환경

3.1 측정 동작 모드 및 대상 설정

3.1.1 측정 동작 모드 설정

스마트폰의 기본적인 입출력 센서 모듈에는 카메라, 터치스크린, 마이크 및 스피커 등이 있으며 거의 모든 스마트폰 어플리케이션들은 상기 모듈들을 통해 사용자와 직접적으로 정보를 교환한다. 따라서 각 센서 모듈의 활성화에 따른 누설 전자파 신호의 특성 분석을 통해 대부분의 주요 스마트폰 동작에 대한 누설 전자파의 특징을 분석할 수 있다. 측정 실험에 사용된 동작 모드에 대한 정의는 표 1에 나타난 바와 같고, 각 동작 모드에서 카메라 모듈의 활성화, 음성 관련 녹음 및 재생 행위들은 각각의 스마트폰 제조사에서 기본적으로 제공하는 관련 어플리케이션 실행을 통해 이루어졌다. 각 동작 모드 중 Camera-On 상태 및 Display-On 상태는 모두 터치스크린이 활성화되는 점에서 매우 유사한 관계를 가지며 Mic.-On 상태 및 Speaker-On 상태 또한, 각각 마이크와 스피커 모듈을 제외한 음향처리 관련 IC들을 모두 공유하므로 유사한 동작으로 여겨진다.

3.1.2 측정 대상 설정

상기 정의한 동작 모드에 따른 스마트폰의 누설 전자파 측정 대상으로는 전세계적으로 프리미엄 스마트폰 시장을 선도해나가고 있는 삼성전자의 갤럭시 S (이하 SGS) 시리즈 6종, 갤럭시 노트(이하 SGN) 시리즈 4종 및 애플사의 iPhone 시리즈 4종을 각각 선정하였다. 이들 두 회사의 스마트폰을 측정 대상으로 선정한 이유는 이들 두 회사의 전세계 스마트폰 시장

표 1. 누설 전자파 측정 실험을 위한 스마트폰 동작 모드 정의
Table 1. Definition of smartphone operating modes for EM-leakage measurement experiments

Operating Modes	Description	Running Application
IDLE	Reference state	Nothing
Display-On	Touchscreen is activated	Nothing
Camera-On	Both touchscreen and main-camera module are activated	Camera App.
Mic.-On	Sound is recorded through the microphone module without touchscreen activation	Voice Record App.
Speaker-On	Sound is played through the speaker module without touchscreen activation	Play in Voice Record App.

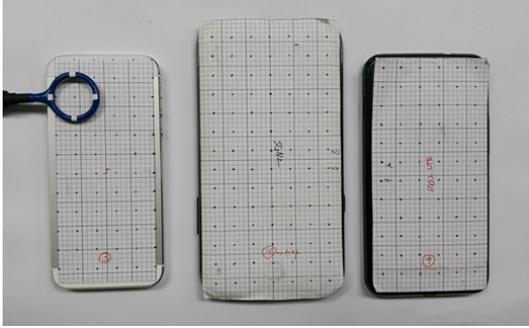
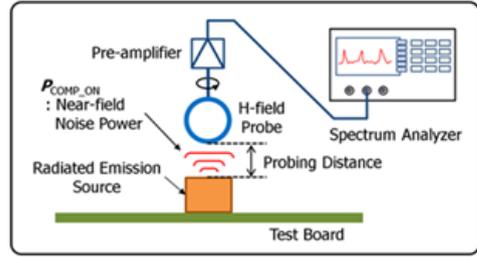


그림 2. 측정 시료의 누설 전자파 측정 포인트 위치
Fig. 2. Locations of EM-leakage measurement points for DUTs(Devices Under Test)

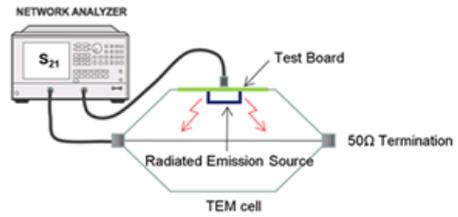
점유율이 2015년 4Q 기준 약 40%에 이르기 때문이 다⁹⁾. 보다 정밀하게 누설 전자파를 측정하기 위해, 그림 2와 같이 각 측정 시료의 뒷면에 모눈종이를 부착하고 좌상단부터 우하단까지 1cm의 격자 간격으로 점을 찍어 측정 매트릭스를 설정한다. 해당 스마트폰 모델별 총 측정 포인트 개수는 표 2와 같이 해당 스마트폰의 크기에 따라 결정되며, 최소 크기를 갖는 iPhone4s의 경우 55개, 최대 크기를 갖는 SGN4의 경우 105개의 측정 포인트를 가진다.

3.2 누설 전자파 측정 시스템 구현

측정 대상의 전자파 간섭(EMI) 영향을 정량적으로 측정하고 분석하기 위한 방법으로는 그림 3과 같은 근거리 자기장을 측정하는 자기장 프로브 측정법,



(a) Magnetic Probe Method



(b) TEM-cell Method

그림 3. 전자파 간섭 영향 측정 방법
Fig. 3. Electromagnetic Inteference Measurement Setup

TEM(Transverse ElectroMagnetic)-cell 측정법 등이 주로 활용되고 있다³⁾. 이 중에서도 EMI 잡음원의 발생 위치를 추적하기 위한 방법으로는 자기장 프로브 방법이 통상적으로 널리 사용되며, 본 논문에서는 Near-field 프로브, 신호 증폭기, 스펙트럼 분석기 및 분석 PC등을 활용하여 그림 4와 같이 스마트폰의 누

표 2. 측정 스마트폰 모델별 총 측정 포인트 수
Table 2. The total number of measurement points for each DUT(device under test)

Model Name	Size(Height x Length x Depth)[7]	Measurement Matrix Size	Total # of Points
iPhone4s	115.2 x 58.6 x 9.3 mm	11 X 5	55
iPhone5	123.8 x 58.6 x 7.6 mm	12 X 6	72
iPhone5s	123.8 x 58.6 x 7.6 mm	12 X 6	72
iPhone6	138.1 x 67 x 6.9 mm	13 X 7	91
SGS	122.4 x 64.2 x 9.9 mm	12 X 6	72
SGS2	125.3 x 66.1 x 8.5 mm	12 X 6	72
SGS3	136.6 x 70.6 x 8.6 mm	12 X 6	72
SGS4	136.6 x 69.8 x 7.9 mm	12 X 6	72
SGS5	142 x 72.5 x 8.1 mm	14 X 7	98
SGS6	143.4 x 70.5 x 6.8 mm	14 X 7	98
SGN	146.9 x 83 x 9.7 mm	13 X 7	91
SGN2	158.1 x 77.82 x 7.1 mm	14 X 7	98
SGN3	151.2 x 79.2 x 8.3 mm	14 X 7	98
SGN4	153.5 x 78.6 x 8.5 mm	15 X 7	105

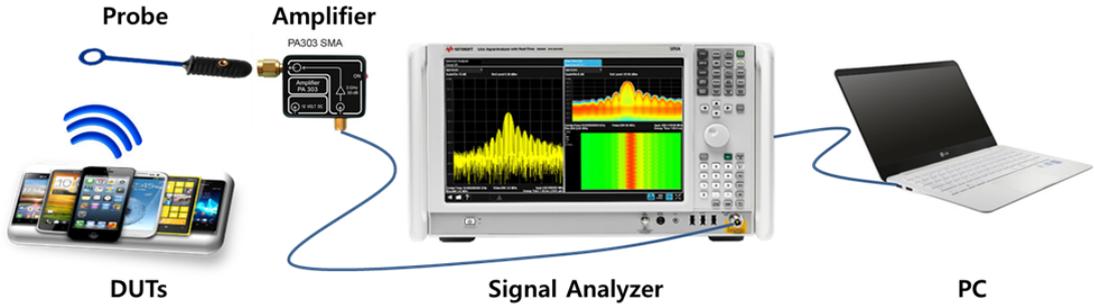


그림 4. 스마트폰 누설 전자파 측정 시스템 구성도
 Fig. 4. Implementation of the smartphone EM leakage measurement system

설 전자파 측정 시스템을 구현하였다. 보다 신뢰성 있는 신호 수집을 위해 Keysight사의 고성능 스펙트럼 분석기를 활용하였으며, 누설 전자파 측정 시스템에 활용된 기타 장비들의 상세 사양은 표 3에 나타내었다¹⁰⁻¹².

누설 전자파 측정은 높은 신뢰도를 확보하기 위해 RF 차폐실에서 수행되었으며, 다음과 같은 과정으로 이루어졌다. Near-field 마그네틱 프로브 원형 루프의 중앙이 그림 2와 같이 DUT 뒷면 측정 포인트에 위치하도록 하고 원형 루프를 DUT 뒷면에 밀착시켜 측정의 정확도를 유지하였다. 측정된 누설 전자파는 신호 증폭기를 통해 30 dB의 전력 이득을 얻어 스펙트럼 분석기로 입력된다. 스펙트럼 분석기는 10 kHz의 RBW, 30 dB Low-Noise 증폭 및 10 dB 입력 감쇠

표 3. 스마트폰 누설 전자파 측정 시스템 구성 장비 사양
 Table 3. Specifications of Smartphone EM-leakage Measurement System

Parameters	Specifications
Near-field Probe(LANGER LF-R 400)	
Frequency Range	100 kHz ~ 50 MHz
Diameter	25 mm(approx.)
Distance	upto 10 cm from DUT
Amplifier(LANGER PA303)	
Bandwidth	100 kHz ~ 3 GHz
Gain	30 dB
Noise Figure	4.5 dB
Maximum Input	3.0 Vpp
Impedance	50 ohm
Signal Analyzer(Keysight UXA N9040B)	
Frequency Range	3 Hz ~ 8.4 GHz
Analysis Bandwidth	10 MHz(Upto 510MHz)
DANL	-150 dBm at 2 GHz
SFDR	-75dBc
Phase noise	120 dBc/Hz at 1GHz
RBW	1 Hz ~ 3, 4, 5, 6, 8MHz

등의 설정을 통해 입력되는 아날로그 신호를 30 MHz 이하 대역의 디지털 스펙트럼 샘플로 변환하고, 이를 제어 프로그램을 통해 분석용 PC의 하드디스크에 파일로 저장한다.

IV. 스마트폰의 동작 모드에 따른 누설 전자파 분석

구현된 스마트폰 누설 전자파 측정 시스템을 활용하여 정의된 동작 모드에 따른 스마트폰 누설 전자파 신호의 스펙트럼 및 방사패턴을 분석하였다. 스마트폰은 같은 세대 모델이라도 출시되는 지역(국가)에 따라 내부 IC소자들의 종류, 배치 및 외형이 조금씩 상이하므로 시료에 따라 누설되는 전자파의 위치 또는 정도가 변화할 수 있다. 이러한 혼란을 최소화하기 위해 본 논문에서는 국내에서 출시된 모델들로 측정 대상을 한정하였다.

4.1 기본 동작 모드에 따른 스마트폰 누설 전자파의 스펙트럼 분석

스마트폰 내부 디지털 IC 소자들은 그림 5와 같이 연결된 메인보드 PCB로부터 전원과 정교한 기준 클

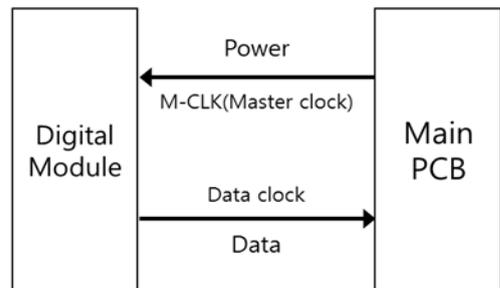


그림 5. 전자파 간섭 영향 측정 방법
 Fig. 5. Electromagnetic Interference Measurement Setup

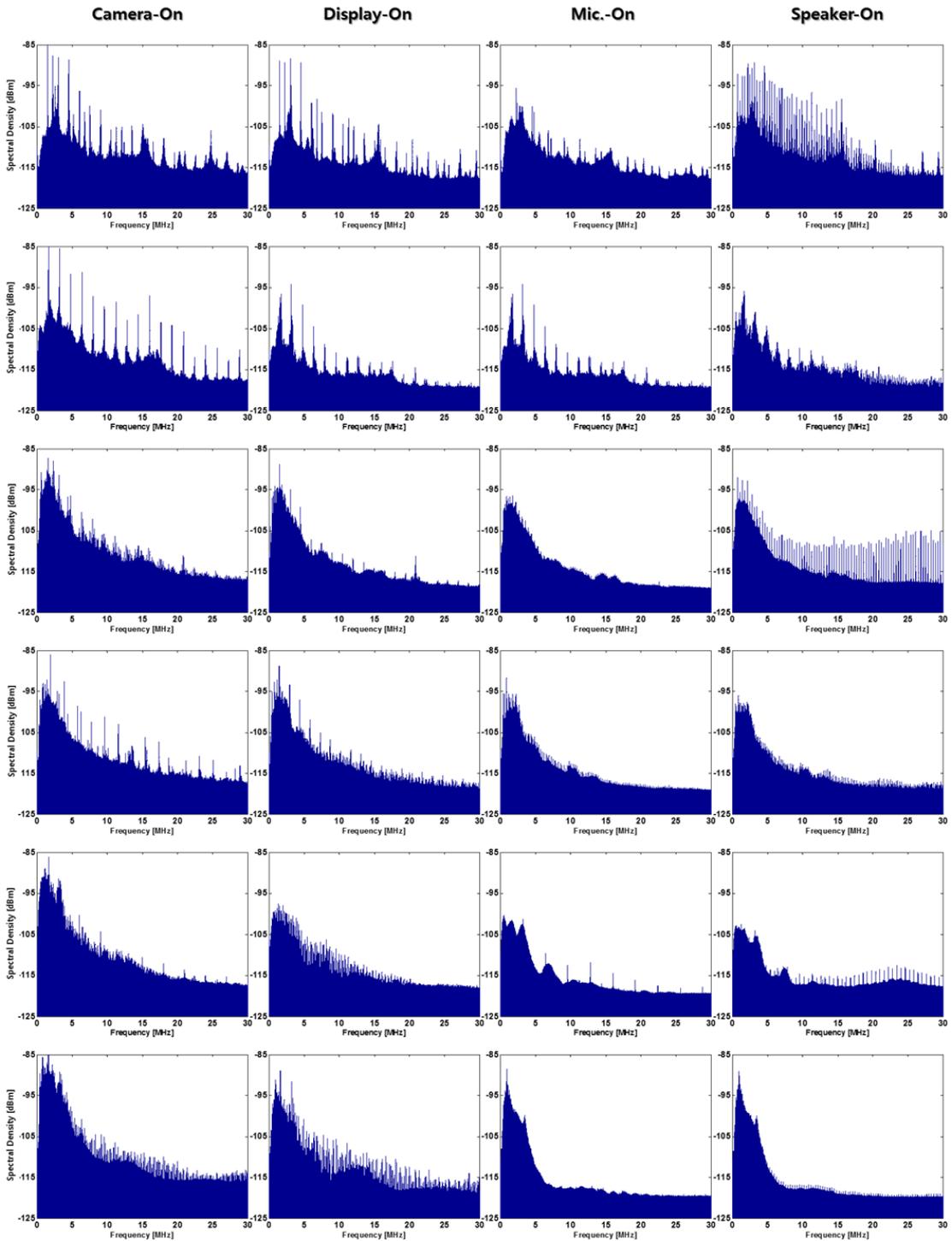


그림 6. 삼성전자 갤럭시 S 시리즈의 동작 모드에 따른 누설 전자파 스펙트럼(위에서부터 SGS, SGS2, SGS3, SGS4, SGS5, SGS6)
 Fig. 6. Spectrum of the EM leakage signals according to operation modes on SGS series(From the top row: SGS, SGS2, SGS3, SGS4, SGS5, SGS6)

력(M-CLK, 일반적으로 저주파)을 공급받고, 이에 동기화하거나 체배한 데이터 클럭(일반적으로 고주파)에 동기화하여 데이터를 주고받는다. 따라서 특정 디지털 모듈이 동작할 경우 해당 모듈 또는 전송선로 주위로 누설되는 전자파의 발생원에는 크게 입력 전원, 소자의 PLL 레퍼런스 신호로 사용되는 기준 클럭, 기준 클럭을 만들어내기 위한 오실레이터 출력, 데이터 클럭 신호등이 있다. 각 전자파 발생원에 따라 누설되는 저주파 전자파는 다음과 같은 주파수 특성을 갖는데, 전원에 의한 누설 전자파의 주파수 성분은 거의 DC에 가까운 저주파로서 잡음 형태로 나타나게 되며, 오실레이터 출력 및 구형파 모양을 가지는 디지털 클럭들은 각각 단일 피크(Peak) 또는 하모닉(Harmonic)

피크들을 가지는 형태의 전자파를 누설한다.

그림 6과 7은 SGS 시리즈 및 SGN 시리즈의 모델별 동작 모드에 따른 누설 전자파의 스펙트럼을 각각 나타내며, 각 스펙트럼 값은 해당 동작 모드에 대해 모든 측정 포인트에서 10 kHz의 RBW로 측정된 spectral density 값(dBm)을 평균한 값을 나타낸다. 공통적으로 스마트폰이 동작하는 경우 각 모듈의 전원 공급에 의한 영향으로 5 MHz 이하의 저주파 대역이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있고 전체적으로 스펙트럼의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 동작 모드별로 사용되는 디지털 소자에 의해 특정 주파수에서 단일 피크 및 하모닉 피크 성분들이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 피크들은 스마트폰

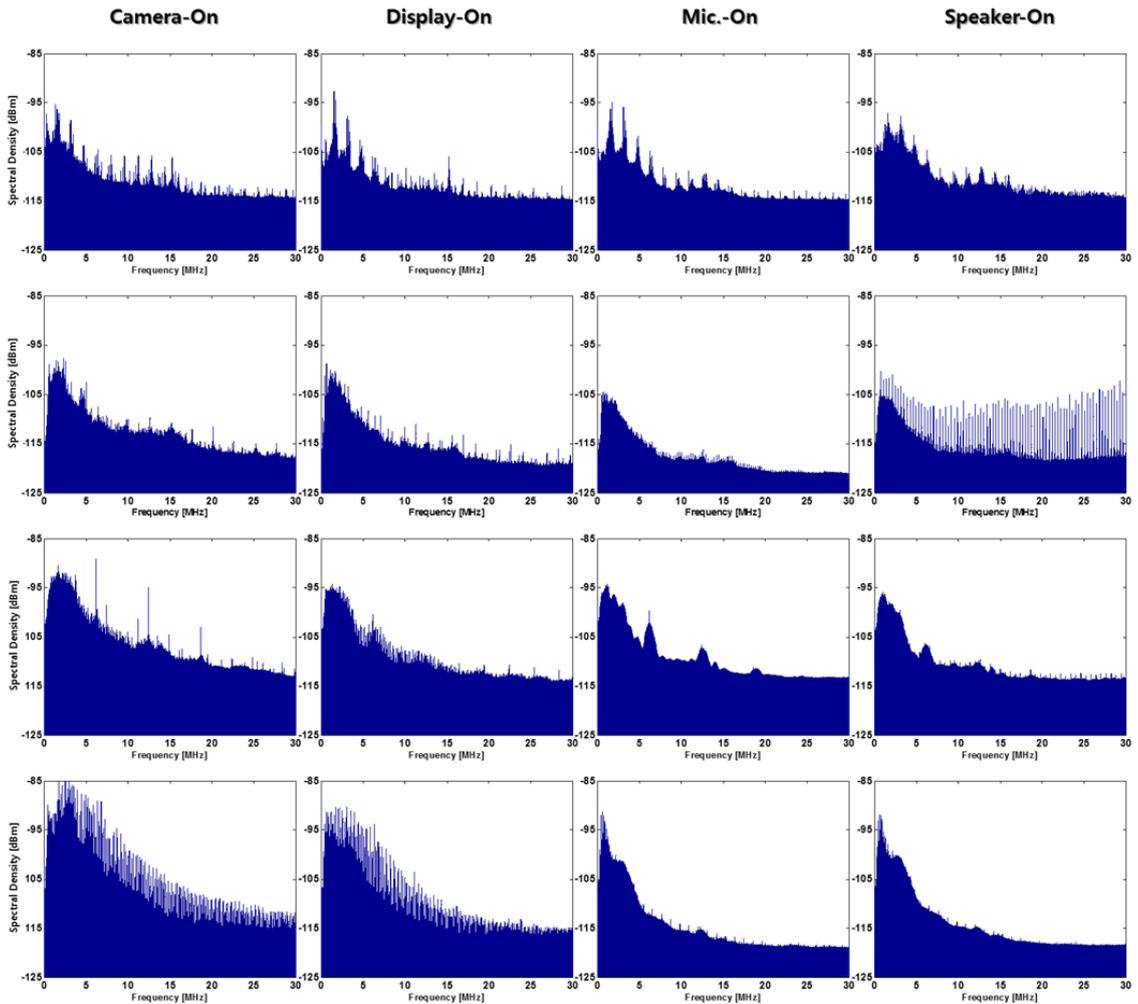


그림 7. 삼성전자 갤럭시 노트 시리즈의 동작 모드에 따른 누설 전자파 스펙트럼(위에서부터 SGN, SGN2, SGN3, SGN4)
Fig. 7. Spectrum of the EM leakage signals according to operation modes on SGN series(From the top row: SGN, SGN2, SGN3, SGN4)

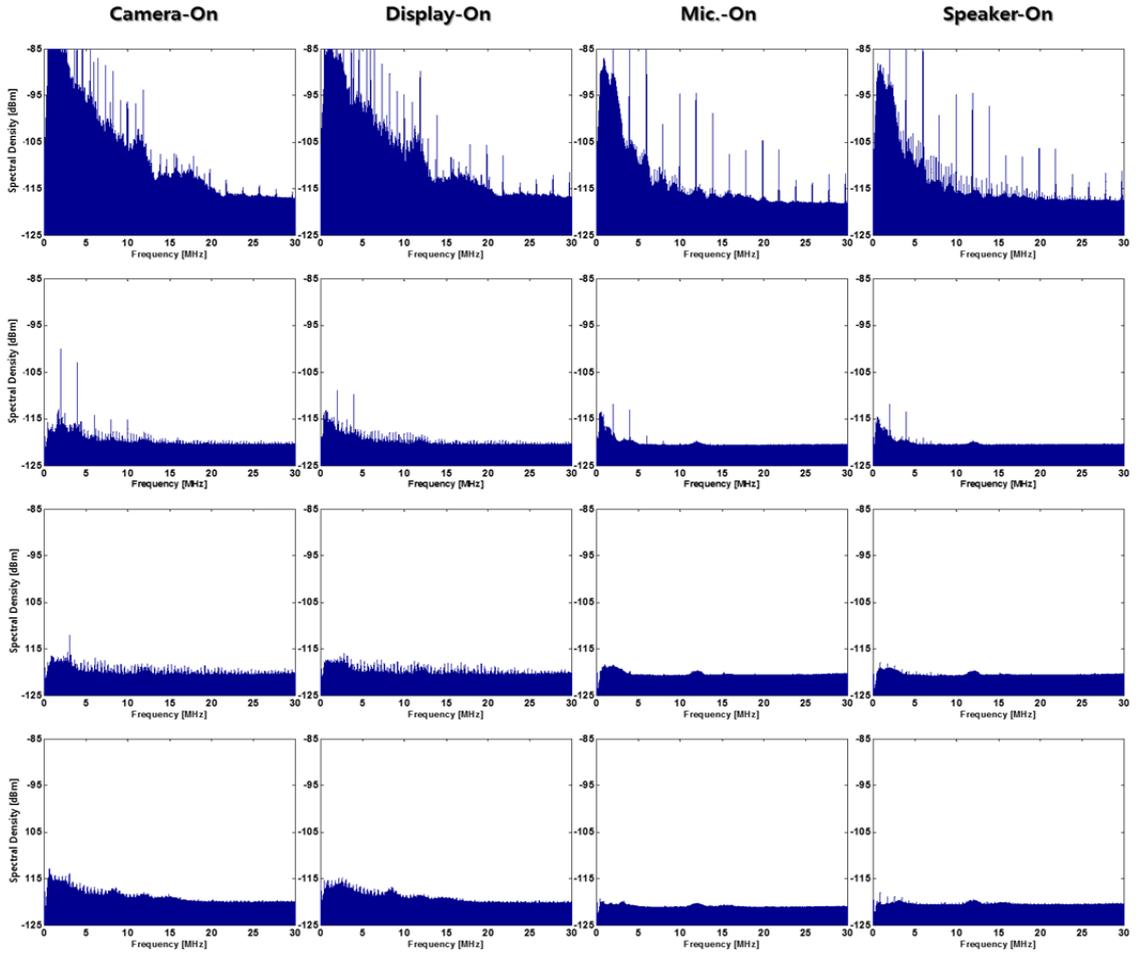


그림 8. 애플사 아이폰 시리즈의 동작 모드에 따른 누설 전자파 스펙트럼(위에서부터 iPhone4s, iPhone5, iPhone5s, iPhone6)
 Fig. 8. Spectrum of the EM leakage signals according to operation modes on iPhone series(From the top row: iPhone4s, iPhone5, iPhone5s, iPhone6)

세대가 진화하면서 모델별로 적용한 IC소자들이 상이하므로 해당 모델 및 동작에 대해 고유의 피크 발생 패턴을 갖는 것을 스펙트럼 형태에서 확인할 수 있다. 이러한 이유로 비슷한 출고시기 또는 제작시기를 갖는 모델들(SGS2와 이를 바탕으로 제작된 SGN, SGS3와 SGN2 등)의 경우에는 매우 비슷한 형태로 피크 또는 하모닉 피크들이 발생하는 확인할 수 있다.

동작 모드별 누설 전자파의 스펙트럼 특징에 대해 살펴보면, Camera-On 모드와 Display-On 모드는 터치스크린의 활성화로 인해 매우 비슷한 형태의 스펙트럼 envelope을 가지며, Camera-On 모드 시 관련 모듈의 동작으로 인해 피크 및 하모닉 성분들이 추가적으로 발생한다. Mic.-On 모드와 Speaker-On 모드의 스펙트럼 또한 매우 비슷한 envelope을 가지며

Speaker-On 모드에서는 모델별로 그 크기 정도는 매우 상이하나 추가적인 피크 또는 하모닉 성분들이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

iPhone 시리즈의 동작 모드별 모든 측정 포인트에 대한 누설 전자파의 스펙트럼은 그림 8에 나타난 바와 같으며, 상기 결과와 마찬가지로 10 kHz의 RBW로 측정된 spectral density 값(dBm)을 평균한 값을 나타낸다. iPhone4s의 경우에만 삼성전자 제품들과 비슷한 정도의 전자파가 누설되고 다수의 단일 피크 또는 하모닉 피크들이 관찰되는 것을 확인할 수 있으며, iPhone5 이후 모델에서는 동작 모드와 무관하게 누설되는 전자파의 크기가 급감하는 것을 확인할 수 있다. 이는 iPhone4s를 포함한 이전 모델에는 스마트폰 바디의 재질로 유리를 적용하였으나 iPhone5 이후

의 모델에서는 유리가 아닌 알루미늄 메탈 재질을 적용함으로써 추가적인 누설 전자파 차폐 효과가 발생한 것으로 분석된다. 비록 iPhone5 이후 모델에서의 저주파 대역 누설 전자파 스펙트럼은 상대적으로 매우 작은 크기와 피크들을 가지지만, 모델 및 동작 모드 별로 발생하는 피크들의 주파수 성분이 각각 다른 것을 확인할 수 있다.

4.2 스마트폰 구조에 따른 누설 전자파의 방사 패턴 분석

그림 9와 10은 각각 SGS 시리즈와 SGN 시리즈의 입출력 센서 모듈 위치 및 기본 동작 모드에 따른 누설 전자파 방사 패턴을 나타낸다. 각 측정 포인트에서의 값은 모든 동작 모드에 대해서 정규화된 누설 전자파 전력을 나타내며 다음과 같은 과정으로 계산되었다. 특정 동작 모드(m)에 대한 측정 포인트(x,y)에서의 누설 전자파 전력은 식 (1)과 같이 스펙트럼 샘플 값들의 합으로 나타낼 수 있다.

$$S_{m,x,y} = 10 \log_{10} \left(\frac{B}{RBW} \cdot \frac{1}{N_{Total}} \sum_{i=1}^{N_{Total}} 10^{(0.1 \times S_{m,x,y}(i))} \right) \quad (1)$$

여기서 $S_{m,x,y}(i)$ 는 스펙트럼 샘플값, i 는 스펙트럼의 주파수 인덱스, N_{Total} 은 스펙트럼 샘플의 총 길이, B 는 전력을 측정하고자 하는 대역폭 및 RBW 는 측정 분해능을 의미한다. 모든 동작 모드 및 측정 포인트에 대해 식 (1)을 적용하여 30 MHz 대역폭에 대한 누설 전자파 전력을 구한 후, 다음 식 (2)를 통해 최종 정규화된 측정값을 구한다.

$$Normalized S_{m,x,y} = \frac{S_{m,x,y} - \min([S_{m,x,y}, \dots, S_{M,X,Y}])}{\max([S_{m,x,y}, \dots, S_{M,X,Y}]) - \min([S_{m,x,y}, \dots, S_{M,X,Y}])} \quad (2)$$

여기서 M 은 총 동작 모드의 수, X 와 Y 는 각각 해당 측정 대상의 최대 가로 방향 측정 포인트 수 및 최대 세로 방향 측정 포인트 수를 의미한다.

SGS 시리즈 및 SGN 시리즈의 경우, 일반적으로 모든 동작 모드에서 스마트폰을 관장하는 AP 및 구동 IC들이 모여 있는 AP 근처에서 상대적으로 큰 저주파 대역 전자파가 누설되는 것을 확인할 수 있다. 카메라 모듈이 활성화되어 동작함에 따라 카메라 모듈 및 주

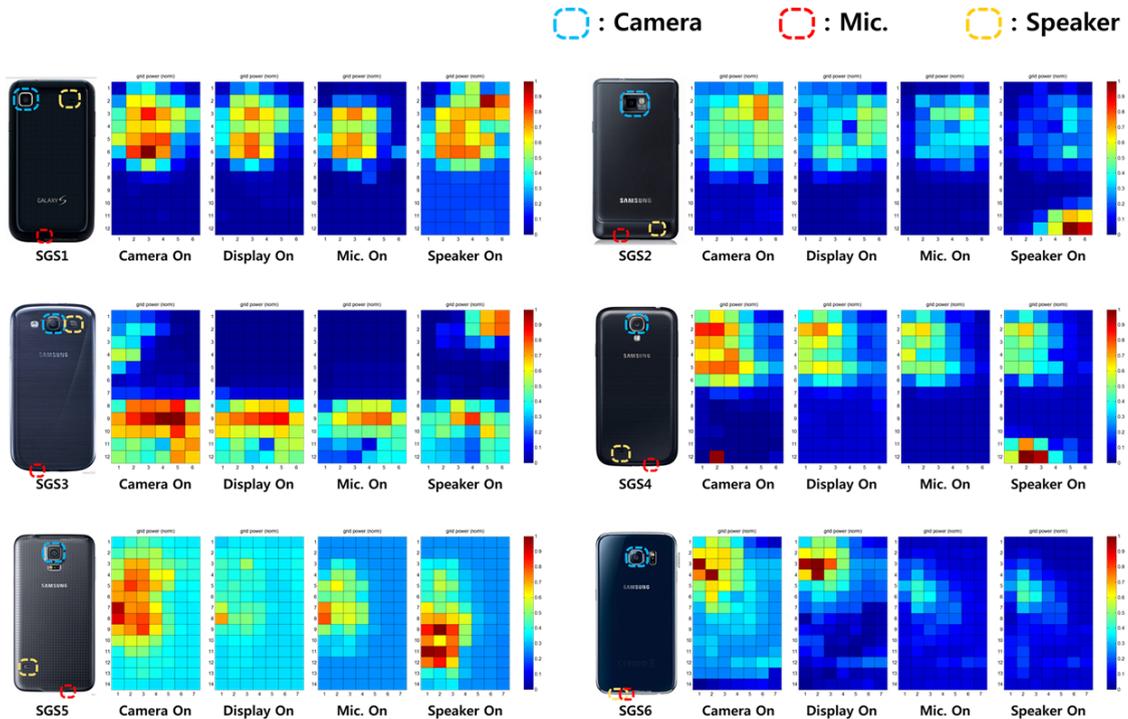


그림 9. 삼성전자 갤럭시 S 시리즈의 동작모드에 따른 누설 전자파 방사 패턴
Fig. 9. The EM leakage radiation patterns according to operation modes on SGS series

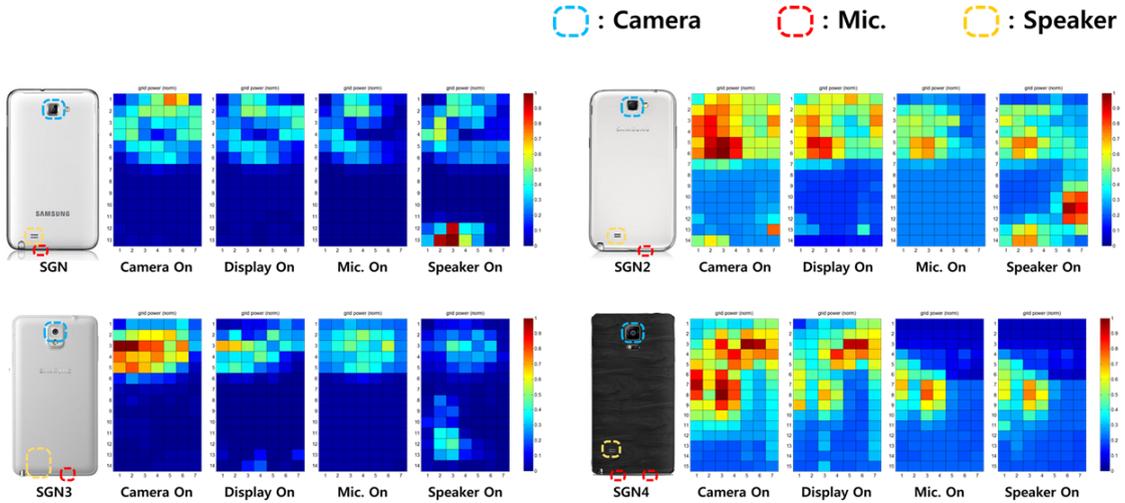


그림 10. 삼성전자 갤럭시 노트 시리즈의 동작모드에 따른 누설 전자파 방사 패턴
 Fig. 10. The EM leakage radiation patterns according to operation modes on SGN series

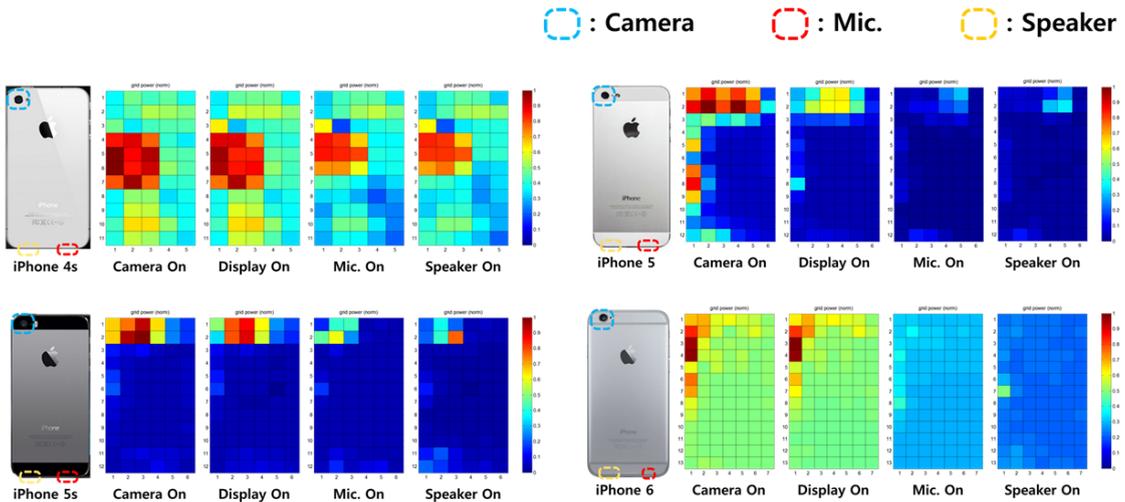


그림 11. 애플사 아이폰 시리즈의 동작모드에 따른 누설 전자파 방사 패턴
 Fig. 11. The EM leakage radiation patterns according to operation modes on iPhone series

위에서 누설 전자파의 방사량이 증가하는 것을 확인할 수 있고, AP 주위의 메인보드에서는 디스플레이 동작 모드와 비교적 비슷한 형태의 누설 전자파가 방사되는 것을 알 수 있다. 이는 두 모드에서 공통적으로 디스플레이를 활성화시키고 이로 인해 동작하는 관련 모듈 및 구동 IC 등이 같기 때문이다. 마이크 동작 및 스피커 동작 시, 메인보드 상에서는 비슷한 패턴의 전자파가 방사되는 것을 확인하였으며 음향이 출력되는 경우, 추가적으로 스피커 모듈 및 그 주위로 강한 저주파 전자파가 누설되는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 iPhone 시리즈의 입출력 센서 모듈의 위치 및 동작 모드에 따른 누설 전자파 방사 패턴을 나타낸다. iPhone4s의 경우 SGS 및 SGN과 비슷하게 동작 모드에 상관없이 상대적으로 큰 전자파가 누설되는 것을 확인할 수 있고, iPhone5 이후의 모델들은 메탈 바디 도입으로 인한 추가적인 차폐 효과로 인해 폰의 상단부 또는 하단부에서만 전자파가 누설되는 것을 확인할 수 있다. iPhone6의 경우 스마트폰 바디의 메탈 재질에 의한 차폐효과가 감소한 것을 확인할 수 있는데, 이는 iPhone5, iPhone5s에 비해 메탈 재질

의 두께가 다소 줄어들었기 때문이다^[13]. 터치스크린이 활성화 되는 동작 모드(Camera-On 및 Display-On)에서 상대적으로 강한 전자파가 누설되는 것을 확인할 수 있으며, Camera-On 모드 시의 누설 전자파 크기가 Display-On 모드에 비해 미세하게 증가하는 것을 관찰할 수 있다. Mic-On 모드와 Speaker-On 모드의 경우 비슷한 누설 전자파 방사 패턴을 가지며 뒷면이 아닌 하단으로 노출되어 있는 스피커 모듈로 인해 Speaker-On 모드 시 갤럭시 시리즈와 같은 강한 누설 전자파가 발견되지 않았다.

V. 결 론

본 논문에서는 스마트폰 내부에서 발생하는 누설 전자파 영향 분석에 관한 연구의 일환으로 국내 출시된 삼성전자 및 애플사의 플래그쉽 모델들에 대해 기본 동작 모드에 따른 누설 전자파의 저주파 대역 특성을 분석하였다. 신뢰성 있는 누설 전자파 측정을 위해 고성능의 상용 측정 장비들을 활용하여 스마트폰 누설 전자파 수집 시스템을 구현하였으며, 측정 시료에 대해 1cm의 격자 간격으로 30 MHz 이하 저주파 대역의 누설 전자파 신호를 정밀하게 측정하였다. 분석 결과, 동작하는 모드에 따라 활성화되는 디지털 IC 모듈의 근처에서 유희 상태 대비 상대적으로 큰 세기의 저주파 대역 전자파가 누설되는 것을 확인할 수 있었고, 누설되는 전자파의 스펙트럼은 각 모듈이 사용하는 디지털 클럭에 따라 고유의 피크 또는 하모닉 성분을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 연구 결과들은 스마트폰 내부의 저주파 대역 누설 전자파 발생원의 추정 및 위치 분석, 저주파 대역 전자파 차폐 대응 방안 개발 등의 연구에 참고 자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한 휴대전화 및 스마트폰에서 수십 MHz 주파수 대역 이하의 전자파흡수율 측정 관련 연구에 스마트폰의 사용에 의한 저주파 대역 누설 전자파 방사 세기를 가늠할 수 있는 기초 자료로 사용될 수 있다. 향후 삼성전자 및 애플사 이외의 스마트폰 제조사들의 인기 플래그쉽 모델들에 대해서도 저주파 대역 누설 전자파 분석을 추가적으로 수행하여 관련 데이터를 확보할 예정이며, 이를 바탕으로 스마트폰 내부의 누설 전자파 영향 분석 연구에 기여하고자 한다.

References

- [1] S. Grivet-Talocia, M. Bandinu, F. Canavero, I. Kelander, and P. Kotiranta, "Fast assessment of antenna-PCB coupling in mobile devices: A macro-modeling approach," in *Proc. 20th Int. Symp. Electromagn. Compati.*, pp. 193-196, Zurich, Switzerland, Jan. 2009.
- [2] Y. Cao and H.-S. Lee, *The effect of digital noise on RF receiver sensitivity in smart-phones applications*(2011), Retrieved Oct., 2015, from <http://www.keysight.com>
- [3] E. Song, H.-B. Park, and H. H. Park, "An evaluation method for radiated emissions of components and modules in mobile devices," in *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 5, pp. 1020-1026, Mar. 2014.
- [4] T.-W. Koo, H. S. Lee, and J.-G. Yook, "Recent trends in system-level EMC investigation and countermeasure technology for RF interference due to high-speed digital system noise," *J. KIEES*, vol. 25, no. 10, pp. 966-982, Oct. 2014.
- [5] W. G. Yang, W. K. Lee, and J. M. Son, "A study on SAR variation by EMI paint distribution and folding angle for mobile handsets," *J. KIEES*, vol 16, no 9, pp. 903-908, Sept. 2005.
- [6] W.-T. Kim and J.-G. Yook, "Thermal steady state in an anatomical model of the human head under high-power EM exposure," *J. KIEES*, vol 21, no 10, pp. 1073-1084, Oct. 2010.
- [7] D. Choi, K. Kim, and J. Choi, "A study on the SAR measurement system validation at 150 MHz band," *J. KIEES*, vol 24, no 10, pp. 1008-1016, Oct. 2013.
- [8] Teardown, *iPhone 5c Teardown*(2013), Retrieved Apr., 16, 2015, from <https://www.ifixit.com/Teardown>.
- [9] IDC, *IDC Worldwide Quarterly Mobile Phone Tracker*(2016), Retrieved Mar., 21, 2016, from <http://www.idc.com>
- [10] Keysight, *N9040B UXA Signal Analyzer User Documentation*(2015), Retrieved Sept., 3, 2015, from <https://www.keysight.com>.
- [11] LANGER EMV-Technik, *Near field probes - type LF*, Retrieved Nov., 3, 2014, from

<https://www.langer-emv.com>.

- [12] LANGER EMV-Technik, *Pre amplifier -PA 303*, Retrieved Nov., 3, 2014, from <https://www.langer-emv.com>.
- [13] PhoneArena, *Apple iPhone6 Review* (2014), Retrieved Mar., 21, 2016, from <http://www.phonearena.com>.

이 영 준 (Young-Jun Lee)

2006년 2월 : 부산대학교 전자전기통신공학부 졸업
 2008년 2월 : 부산대학교 전자전기공학과 석사
 2012년 8월 : 부산대학교 전자공학과 박사
 2013년 12월~현재 : 한국전자통신연구원 부설연구소
 <관심분야> 디지털 방송통신 신호처리, 적응신호처리

박 희 선 (Heesun Park)

2004년 2월 : 한양대학교 전자전기공학부 학사
 2007년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2011년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 박사
 2011년 7월~현재 : 한국전자통신연구원 부설연구소
 <관심분야> 무선통신 신호처리

권 영 현 (YoungHyoum Kwon)

1997년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 학사
 1999년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2005년 8월 : KAIST 전자전산학과 박사
 2005년~2010년 : LG전자
 2010년 9월~현재 : 한국전자통신연구원 부설연구소
 <관심분야> WPAN, WLAN, Cellular 통신신호처리

이 재 기 (Jaeki Lee)

2001년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 학사
 2004년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2010년 11월 : KAIST 전기및전자공학과 박사수료
 2010년 12월~현재 : 한국전자통신연구원 부설연구소
 <관심분야> 이동통신망, 무선 자원할당

최 지 은 (Ji-Eun Choi)

2007년 2월 : 고려대학교 전자전기전파공학부 학사
 2009년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2009년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 부설연구소
 <관심분야> 통신신호처리, 적응신호처리

조 상 우 (Sangwoo Cho)

1992년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 학사
 1997년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2003년 8월 : KAIST 전기및전자공학과 박사
 2004년 6월~현재 : 한국전자통신연구원 부설연구소
 <관심분야> 신호처리, 사이버보안