

5G NR 기지국의 전자파 노출량 평가 방법 제안

Proposal of Method to Evaluate Exposure of EMF from 5G NR Base Station

김 창 주 · 전 상 봉* · 최 형 도*

Chang-Joo Kim · Sangbong Jeon* · Hyung-Do Choi*

요 약

5G NR(new radio) 기지국의 구축이 세계적으로 늘어남에 따라 기지국의 인체노출량을 평가하기 위한 EMF(electromagnetic field) 측정 방법이 중요한 문제로 떠오르고 있다. 5G NR은 능동 안테나 시스템 기술의 사용으로 OTA(over the air) 측정을 해야 한다. 더욱이 5G NR은 eMBB(enhanced mobile broadband), URLLC(ultra reliable low latency communications), 그리고 massive MTC(machine type communications)에 이르기까지 다양한 서비스를 제공한다. 따라서 5G NR 기지국은 제공되는 서비스에 따라 트래픽 정보의 변화가 심할 뿐만 아니라, 핫스팟 지역에 많은 기지국이 설치되기 때문에, 기지국 별로 EMF를 신뢰성 있게 측정하는 방법이 필요하다. 5G NR 기지국의 EMF를 안정적으로 측정하기 위해서는 “always-on” 신호이면서 기지국의 트래픽에 영향을 받지 않는 신호를 선택하여 측정하여야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 5G NR의 SS/PBCH(synchronization signal/physical broadcast channel) 신호를 토대로 EMF를 측정하는 디코더를 이용한 방법과 스펙트럼을 이용한 측정 방법을 분석하였다. 그 결과, 평가 목적에 따라 EMF 노출량 측정방법을 구분하여 평가되어야 한다는 것을 제안한다. 또한, 기지국의 전자파 노출 적합성 평가는 측정의 신뢰도를 높일 뿐만 아니라, 기지국별로 정확하게 EMF를 측정할 수 있는 SSS(secondary synchronization signal) 기반의 디코더를 이용한 방법으로 측정하는 것을 제안한다.

Abstract

The proliferation of 5G new radio (NR) base stations (gNBs) worldwide sheds light on electromagnetic field (EMF) measurements of gNB to assess human exposure. Over-the-air (OTA) measurement of gNBs is mandatory because 5G NR uses an active array antenna. Furthermore, it is well known that 5G NR provides various types of services such as enhanced mobile broadband (eMBB), ultra-reliable low-latency communications (URLLC), and massive machine-type communications (MTC). Therefore, in the case of 5G NR gNB, a reliable method of EMF measurement for each gNB is required because the traffic information varies greatly depending on the services provided, and many gNBs are installed in a hotspot area. Thus, EMF measurements involve the selection of the synchronization signal/physical broadcast channel (SS/PBCH) block, which is “always-on” and does not depend on traffic signals. In this study, we analyze the methods used to measure EMF for 5G NR, which involve the application of instruments such as a dedicated NR decoder or spectrum analyzer. Consequently, we assert that EMF measurement methods should be classified and implemented according to their evaluation purposes. In addition, we propose that the compliance for installing gNBs should be measured by using a dedicated NR decoder based on a secondary synchronization signal (SSS) that can not only increase the reliability of the measurement but also accurately measure the EMF exposure for each gNB.

Key words: 5G NR, EMF, Code-Selective Measurement, SSS, Extrapolation Factor

「본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [2019-0-00102, 복합 전파환경에서의 국민건강 보호기반 구축]」

(주)휴라 (e-mail: cjkim@hura.co.kr)

*한국전자통신연구원 (Electronics and Telecommunication Research Institute)

· Manuscript received November 17, 2021 ; Revised December 15, 2021 ; Accepted March 14, 2022. (ID No. 20211117-104)

· Corresponding Author: Hyung-Do Choi (e-mail: choihd@etri.re.kr)

I. 서 론

LTE(long term evolution), 5G NR(new radio), 그리고 Wi-Fi 등 무선통신의 눈부신 발달과 함께 우리의 인체는 매우 다양한 종류의 EMF(electromagnetic field)에 노출되고 있다. EMF 노출은 인체의 건강과 안전에 해로운 영향을 줄 수 있어서 ICNIRP(International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection), IEEE Std. C 95.1에서는 주파수 별로 노출량의 한계치를 규정하고 있다^{[1][2]}. 2019년 3월 5G NR의 상용화와 함께 우리나라에도 5G NR 기지국이 급속히 늘어나고 있다. 더욱이 5G NR은 기존 4G 시스템에 비해서 높은 주파수인 3.5 GHz 대역과 28 GHz 대역을 사용하기 때문에 전파 특성상 기지국의 수는 증가할 수밖에 없다. 따라서 우리나라에서는 국민의 건강과 안전을 위하여 기지국이 전파법의 전자파인체보호기준을 준수하는지를 확인하여야 하고, 이를 위하여 5G NR 기지국에 대한 신뢰성 있는 EMF 평가 방법을 마련해야 한다.

IEC(International Electromechanical Commission) TC106에서는 전자기장 노출 제한치 준수를 평가하는 데 사용되는 측정 기술을 다루고 있다. 특히, IEC 62232 표준은 5G NR 기지국에 대한 EMF 측정 표준을 개발 중에 있다^[3]. 이 표준은 110 MHz~300 GHz 주파수 범위에서 방사되는 RBS(radiocommunication base stations) 부근의 RF 전기장 강도, 전력밀도 및 전자파흡수율(specific absorption rate) 수준을 평가하는 내용을 다룬다. 평가의 기본 원칙은 일정한 RF 소스에서 수신된 전력을 측정함으로써 평가된다. 이 방법은 RBS 소스의 위치에서 얻을 수 있는 최대값이 되도록 하며, 기술별로 2G, 3G 및 4G 기술에 대해 표준화되어 있지만, 5G 기술에 대해서는 현재 개발 중에 있다. 실제로 빔 스위핑 및 massive MIMO(multiple input multiple output)와 같은 유연한 numerologies, TDD(time division duplex) 기술, 공간 다중화 기술 등이 사용되기 때문에, 5G NR 신호의 EMF 측정을 위한 새로운 절차 및 프로토콜을 정의해야 한다. 4G 기지국을 평가하기 위해 도입된 환산기법은 5G NR 기지국을 평가하는 데 매우 실용적인 기법이다. 일반적으로 파일럿 신호와 같은 세기가 일정한 신호의 전력을 측정하고, 적절한 환산계수(extrapolation factor)를 적용하여 최대 노출 수준을 계산하는 방

법이다. 현재 개발 중인 표준에서는 5G NR 기지국 평가를 위한 환산기술로 동기신호 블록(synchronization signal block)의 RE(resource element) 당 수신 전력을 측정하고, 이로부터 환산계수(트래픽 신호와 브로드캐스트 신호의 포락선 비, SCS(sub-carrier spacing) 주파수와 전체 전송 주파수 비, 듀티 비, 전력 감소 계수)를 적용하여 최대 노출 수준을 도출한다.

IEC에서는 SSB의 RE당 수신 전력을 측정하기 위한 방법으로는 디코더를 사용한 방법과 스펙트럼 분석기를 사용한 방법을 제안하고 있다. 디코더를 사용한 방법은 코드 영역에서 SSB 신호의 PSS(primary synchronization signal), SSS(secondary synchronization signal), PBCH(physical broadcast channel) 혹은 PBCH-DMRS(demodulation reference signal)의 전력을 측정하는 방법이며, 오직 SSS의 디코딩만 각 셀 ID를 구분하여 측정 가능하다. 스펙트럼 분석기를 사용한 방법은 시간 영역에서 SSB 신호의 중심 주파수를 설정하고, 제로스팬 기능을 이용하여 SSB의 전력을 측정하는 방법이다. 스펙트럼 분석기를 사용한 방법은 게이팅 방법을 통해 기지국으로부터 방사되는 브로드캐스트 신호와 트래픽 신호를 구분하는 방법이 필요하며, 따라서, 시간 게이팅 기능이 포함된 장비로만 측정이 가능하다. 그러나 동일한 SSB 신호의 중심 주파수를 사용하는 다수의 기지국으로부터 방사되는 신호의 구분이 불가능하다. 이에 반해 디코더를 사용한 방법은 각 셀별로 구분된 RE당 수신되는 전력 측정이 가능하다. 따라서, 측정의 신뢰도를 높이면서 기지국 별로 EMF를 측정할 수 있다.

본 논문에서는 5G NR의 기술 특성을 분석하고, 5G NR의 신호 특성을 토대로 EMF를 신뢰성 있게 측정하는 방안을 검토하여 5G NR 기지국의 EMF 측정 방안을 도출하고자 한다.

II. 5G NR 전송 기술

2-1 Scalable OFDMA

IMT-2020의 3가지 서비스 요구사항은 최대 20 Gbps의 전송속도와 100 Mbps 이상의 이용자(user) 체감 전송속도를 제공하는 eMBB(enhanced mobile broadband) 서비스,

표 1. 5G NR의 scalable numerology^[6]

Table 1. Scalable numerology of 5G NR.

Sub-carrier spacing	15 kHz	30 kHz	60 kHz	120 kHz	240 kHz
Symbol duration (μ s)	66.67	33.3	16.7	8.33	4.17
Cyclic prefix duration (μ s)	4.7	2.3	1.2 (normal) 4.13 (extended)	0.59	0.29
Max. bandwidth	50 MHz	100 MHz	100 for FR1 200 for FR2	400 MHz	400 MHz
Max. FFT	4,096	4,096	4,096	4,096	4,096
Symbol per slot	14	14	14 (normal) 12 (extended)	14	14
Slot per sub-frame	1	2	4	8	16
Slot per frame	10	20	40	80	160

임무 수행에 필수적인 적용을 위한 1 ms 이하의 종단 장치(E2E: end-to-end) 간 초저지연 통신과 초고신뢰 통신의 URLLC(ultra reliable low-latency communication), 그리고 km^2 당 100만 개 이상의 IoT 장치를 수용하는 massive MTC (machine-type communication) 기능을 만족시켜야 한다고 규정하고 있다^[4]. 이와 같은 ITU-R의 3가지 요구사항을 만족시키기 위해서는 5G NR의 전송 규격이 매우 융통성이 있어야 한다. 먼저 5G NR의 파형과 프레임 구조가 상기의 3가지 요구사항을 모두 만족하려면 표 1에 나타난 scalable numerology를 가져야 한다. Scalable numerology는 부분 대역폭(bandwidth part)마다 서로 다른 서비스를 제공할 수 있도록 OFDMA의 SCS와 심볼 주기 등을 서로 다른 구조로 설정하는 것이다^{[5],[6]}. 표 1에서 FR1(frequency range 1)은 주파수가 450~7,125 MHz이고, FR2(frequency range 2)는 24,250~52,600 MHz이다.

2-2 5G NR의 프레임 구조

5G NR의 프레임 구조는 URLLC와 같은 초저지연 서비스를 제공해야 할 뿐만 아니라, UHF 대역부터 밀리미터파 대역에 이르기까지 다양한 대역에서 서비스를 제공해야 한다. 이러한 사항을 고려하여 5G NR의 프레임 구조는 그림 1에 나타난 바와 같이 고정된 길이를 갖는 프레임과 서브 프레임, 그리고 슬롯과 심볼처럼 유연하게 개수를 조정할 수 있게 설계하였다. 예를 들면 하나의 서브 프레임은 SCS에 따라 {1, 2, 4, 8, 16}개의 슬롯으로 구

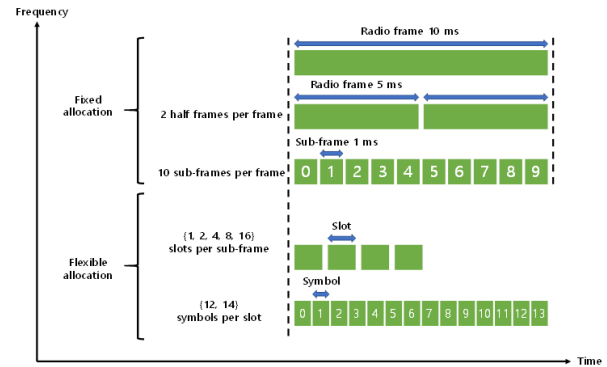
그림 1. 5G NR의 프레임 구조^[6]

Fig. 1. Frame structure of 5G NR.

성할 수 있고, 하나의 슬롯은 {12, 14}개의 연속된 OFDM 심볼을 가질 수 있다. 그림 1에서 보듯이 하나의 프레임은 10 ms의 고정된 길이로 구성된다. 그림 1에서 가로축은 시간이고, 세로축은 주파수이다. 프레임은 10개의 서브 프레임으로 나누어지고, 각 서브 프레임은 1, 2, 4, 8, 16개의 슬롯으로 구성된다. 하나의 슬롯은 통상 14개의 OFDM 심볼로 구성되나, URLLC를 위하여 미니 슬롯, 즉 {2, 4, 7}개의 OFDM 심볼로 구성할 수 있다. 이와 같이 5G NR에서는 초저지연 목표를 달성하기 위해서는 기존의 프레임 구조에서 전송시간을 최소한으로 줄이기 위하여 전송 프레임의 구조를 수정할 필요가 생겨 미니 슬롯을 새롭게 정의하였다. 한편, 프레임은 5 ms의 길이를 갖는 2개의 하프 프레임으로 구분하기도 한다. 그리고 SCS가 60 kHz인 경우에는 extended CP(cyclic prefix)를 사용할 수 있다. 이는 서비스 영역을 확장하거나, MBMS(multi-media broadcast multicast service) 서비스를 제공하는 경우에 사용할 수 있는 규격이다^[5].

2-3 5G NR의 셀 탐색 및 빔포밍

3GPP에서는 이러한 프레임 구조와 scalable OFDMA 기술을 이용하여 5G NR의 기지국과 사용자 간에 동기를 맞출 수 있도록 SSB를 설계하였다. SSB는 그림 2에 나타난 바와 같이 PSS, SSS, PBCH, 그리고 PBCH-DMRS 신호로 구성된다. 그림 2에서 보듯이 SSB는 4개의 OFDM 심볼로 구성되고, 각 OFDM 심볼은 240개의 연속적인 부반송파로 구성된다. 제 II장에서 기술한 바와 같이 5G NR은

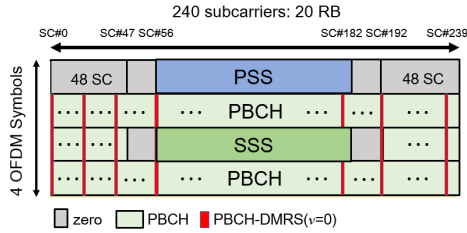


그림 2. 5G NR의 동기신호블럭

Fig. 2. SSB of 5G NR.

scalable OFDMA 전송방식을 사용하기 때문에 사용하는 부반송파 간격에 따라 SSB의 대역폭은 다르게 된다. 예를 들어 SCS가 15 kHz인 경우에는 SSB의 대역폭이 3.6 MHz이고, SCS가 30 kHz면 7.2 MHz가 된다. 한편, FR2 대역은 SCS가 120 kHz 또는 240 kHz므로 SSB 대역폭은 최대 57.6 MHz까지 늘어난다^[5].

표 2는 SS/PBCH의 세부 내용을 구체적으로 정리한 것이다. 각 신호에 대하여 OFDM 신호의 번호와 각 부반송파별로 신호의 위치를 표시하였다. 표 2에서 $v = N_{ID}^{cell} \bmod 4$ 이다. 이는 PBCH-DMRS는 v 의 값에 따라 위치가 달라진다는 것을 나타낸다^[5].

그림 3에 나타낸 바와 같이 5G NR의 셀 탐색은 서비스 영역을 여러 개의 빔으로 나누어 탐색한다. 밀리미터파를 사용하는 5G NR은 전파손실이 크기 때문에 기존의 안테

표 2. SS/PBCH 블록 내의 자원분배^[5]

Table 2. Resources within an SS/PBCH block.

Channel or signal	OFDM symbol number 'l' relative to the start of an SSB	Sub-carrier number 'k' relative to the start of an SSB
PSS	0	56, 57, ..., 182
SSS	2	56, 57, ..., 182
Set to '0'	0	0, 1, ..., 55, 183, 184, ..., 236
	2	48, 49, ..., 55, 183, 184, ..., 191
PBCH	1, 3	0, 1, ..., 239
	2	0, ..., 47, 192, 193, ..., 239
DMRS for PBCH	1, 3	$0+v, 4+v, 8+v, \dots, 236+v$
	2	$0+v, 4+v, 8+v, \dots, 44+v$ $192+v, 196+v, \dots, 236+v$

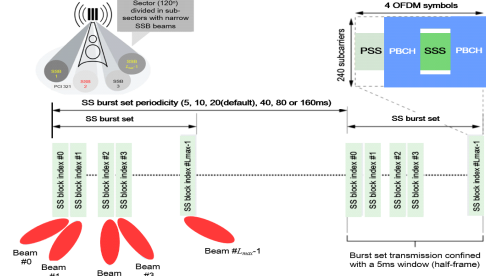
그림 3. 동기 신호 버스트 세트^[6]

Fig. 3. Synchronization signal burst set.

나 방식을 그대로 사용하면 셀 커버리지가 매우 좁아진다. 28 GHz 대역을 사용하면 2 GHz 대역보다 약 20 dB 정도의 경로 손실이 추가로 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여 5G NR에서는 빔포밍 기술을 이용하여 서비스 영역을 확장한다. 기지국과 사용자의 빔이 서로 마주 보는 방향으로 지향하면 송수신기의 안테나 이득으로 인하여 서비스 영역을 충분히 확장할 수 있다. 이와 같은 사유로 인하여 5G NR에서는 셀 탐색 신호부터 빔포밍 기술을 사용한다. 그림 3에서 보듯이 서비스 영역을 SSB의 개수로 분할하여 기지국이 SSB 신호를 순차적으로 전송하면 단말기는 수신되는 여러 개의 SSB 빔 중에서 신호의 세기가 가장 강한 SSB 빔을 확인하고, SSB 번호를 기지국에 보내줌으로써 기지국이 단말기가 원하는 방향으로 신호를 전송한다. 그림 3에서 SS 버스트의 주기는 20 ms를 기본값으로 하고, 운용환경에 따라 5 ms부터 160 ms까지 가변적으로 설정할 수 있다. SS 버스트는 5 ms 이내로 정해져 있다. 그리고 SCS에 따라 OFDM 심볼 주기가 다르기 때문에 시간영역에서의 점유 시간이 SCS에 따라 서로 달라진다.

SSB 버스트는 주파수 대역과 SCS에 따라 표 3과 같이 5가지 종류가 있다. 표 3에서 L_{max} 는 SS/PBCH 블록의 최대 개수를 나타낸다. 3 GHz 이하의 주파수에서는 $L_{max}=4$, $3 \text{ GHz} < f \leq 7.125 \text{ GHz}$ 에서는 $L_{max}=8$, 그리고 FR2에서는 $L_{max}=64$ 이다. 이는 FR2에서는 빔 폭이 좁은 SS/PBCH를 많이 사용하여 서비스 영역을 더욱 확장할 수 있다. 그림 4는 기지국에서 순차적으로 빔을 스위칭하는 과정과 사용자가 SSB 빔의 신호세기를 결정한 후에 수신된 SSB 빔 중에서 신호의 세기가 가장 강한 SSB 빔을 선택하는 과

표 3. SS/PBCH 블록에 대한 OFDM 시작 심볼^[7]

Table 3. OFDM starting symbol for the SS/PBCH block.

SCS	OFDM starting symbols of the candidate SSBs	$f_c \leq 3$ GHz ($L_{max}=4$)	$3 \text{ GHz} < f_c \leq 7.125$ GHz ($L_{max}=16$)	$f_c > 24.25$ GHz ($L_{max}=64$)
Case A (15 kHz)	$\{2, 8\}+14n$	2, 8, 16, 22	2, 8, 16, 22, 30, 38, 44, 50	NA(not applicable)
Case B (30 kHz)	$\{4, 8, 16, 20\}+28n$	4, 8, 16, 20	4, 8, 16, 20, 32, 36, 44, 48	NA
Case C (30 kHz)	$\{2, 8\}+14n$	2, 8, 16, 22	2, 8, 16, 22, 30, 38, 44, 50	NA
Case D (120 kHz)	$\{4, 8, 16, 20\}+28n$	NA	NA	4, 8, 16, 20, ..., 508, 512, 520, 524
Case E (240 kHz)	$\{8, 12, 16, 20, 32, 36, 40, 44\}+56n$	NA	NA	8, 12, 16, 20, ..., 508, 512, 520, 524

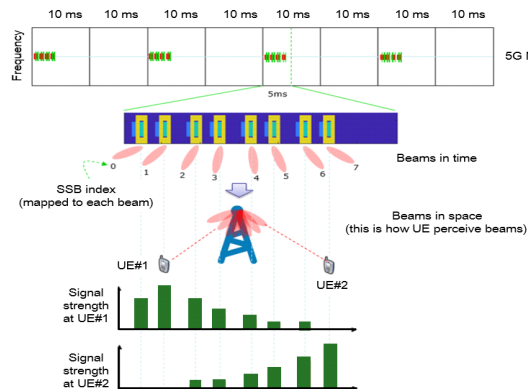
그림 4. SSB 신호 수신 및 SSB 선택 방법^[8]

Fig. 4. Received SSB signal and selection of SSB.

정을 나타낸다. 한편, 사용자는 수신되는 여러 SSB 신호 중에서 신호의 세기가 가장 센 빔의 번호를 선택하여 기지국에 알려준다. 그림 4는 이러한 과정을 시간 축에서 나타낸 그림으로 UE#1은 SSB#1을, UE#2는 SSB#7을 선택한다.

사용자는 여러 개의 SSB 중에서 가장 세게 들어오는 빔의 방향으로 사용자의 빔을 형성하고, PRACH(physical random access channel) 신호를 전송하여 기지국과 연결을 시도한다. 연결되고 나면 기지국에서 보내는 CSI-RS(channel state information-reference signal) 신호를 토대로 채널 상태를 기지국으로 전달한다. 기지국은 채널 상태 정보를 활용하여 정보를 선행 부호화하여 사용자가 트래픽 데이터를 잘 수신할 수 있도록 한다. 그리고 트래픽 정보를 전송

할 때는 아날로그 빔포밍에 디지털 빔포밍을 추가한 하이브리드 빔포밍 기술을 사용하여 안테나의 이득을 더욱 높인다. 따라서 빔 매니저먼트가 중요한 기술로 대두되고 있을 뿐만 아니라, 5G NR의 대역폭은 통상 3~7.125 GHz 대역에서는 최대 100 MHz, 그리고 28 GHz 대역에서는 400 MHz로 대역폭이 매우 넓다. 따라서 모든 사용자가 대역폭 전체를 커버할 필요가 없기 때문에, 부분 대역폭 기술을 사용하여 서비스에 필요한 대역폭을 사용하는 사용자를 구현할 수 있다. 그림 5는 셀 탐색을 위한 빔과 트래픽 정보를 전달하는 빔을 나타낸다. 최근 들어 5G NR의 안테나로 massive MIMO가 각광을 받고 있다. 그러나 massive MIMO의 안테나 전체를 디지털 선행 부호화를 통하여 제어하기에는 너무 복잡하다. 현재 구현되고 있는 시스템은 그림 5에 나타낸 바와 같이 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍을 조합한 하이브리드 빔포밍 기술을 사용

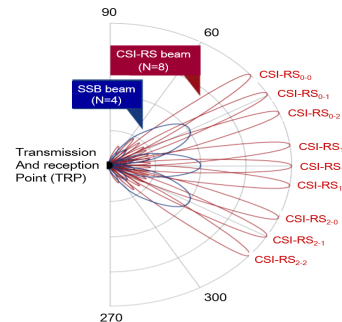
그림 5. SSB와 트래픽 신호 빔^[9]

Fig. 5. Beams for SSB and traffic signal.

하고 있다.

Ⅲ. 5G NR의 EMF 측정 방법

5G NR 신호의 EMF 노출량 평가를 위해서는 먼저 트래픽 신호의 영향을 받지 않고 항상 측정이 가능한 “always-on” 신호 성분을 추출하는 것이 가장 중요하다. 이러한 조건을 만족하는 신호가 SSB이다⁵⁾. 5G NR의 SSB 신호 특성을 이용하여 환산된 전기장 (electric field) 강도를 구하는 방법은 식 (1)에 나타난 바와 같이 두 가지 단계로 구분된다³⁾. 첫 번째 단계는 5G NR의 신호 중에서 트래픽의 영향을 받지 않는 SSB를 추출하여 신뢰성이 높은 전기장 측정값을 얻는다. 두 번째 단계는 첫 번째 단계에서 얻은 E_{SSB} 의 값에 5G NR 신호의 특성에 맞는 환산계수를 곱하여 최대 EMF의 추정값을 산출한다. 환산계수는 최대 노출값을 추정하기 위해 필요한 인자이다. 트래픽 신호와 브로드캐스트 신호의 빔 포락선의 비, 부반송과 주파수와 전체 전송 주파수의 비, TDD 방식의 업링크/다운링크 비율, 전력 감소 계수 등으로 결정된다.

$$E_{ext} = E_{SSB} \cdot \sqrt{F_{extSSB}} = E_{SSB} \cdot \sqrt{F_{extBeam} \cdot F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC}} \quad (1)$$

여기에서 E_{SSB} 는 수신된 SSB 중에서 가장 강한 빔의 RE 당 측정된 전기장의 세기이고, F_{extSSB} 는 SSB 신호를 기준으로 5G NR 신호의 전기장을 추정하는 환산계수이다. $F_{extBeam}$ 은 트래픽과 브로드캐스트 빔의 이득 차로 인한 인자로서 각 빔 포락선의 비율이고, F_{BW} 는 부반송과 주파수와 전체 전송 주파수의 비율, F_{TDC} 는 TDD 방식의 다운링크와 업링크의 비율을 나타낸다. 그리고 F_{PR} 은 최대 전력대비 실제 출력의 비로서 전력 감소 계수이다. 환산계수 $F_{extBeam}$ 은 예를 들어 트래픽과 브로드캐스트 빔 안테나 이득이 동일하면 그 값은 1이고, FDD 방식이면 F_{TDC} 인자값은 1이다. F_{PR} 은 기지국의 최대 출력 전력 대비 실제 출력의 비를 모를 때는 1을 사용한다. 서두에서 언급한 것처럼 5G NR의 EMF 평가를 위해서는 파일럿 신호와 같은 세기가 일정한 신호의 전력을 측정하여야 하며, 이를 측정하기 위한 방법으로는 스펙트럼 분석기를 사용한 방법과 디코더를 사용한 방법의 2가지가 있다.

3-1 스펙트럼 분석기를 이용한 방법

스펙트럼 분석기를 이용한 E_{SSB} 측정 방법은 RE 당 SSB 전력을 얻기 위해서 스펙트럼 분석기의 중심 주파수를 SSB의 중심 주파수에 맞추고, 제로스팬(zero span)기능을 사용한다. 그리고 RBW(resolution bandwidth)를 127 SCS의 대역폭보다 작게 설정하고(예를 들어 1 MHz), 스펙트럼 분석기의 검출 모드는 RMS(root mean square)로 설정한다. 만약 검출 모드에서 RMS가 설정이 되지 않으면, 샘플 모드 혹은 피크 모드로 설정한다. 이 때 부반송과 주파수가 30 kHz일 때는 VBW(video bandwidth)를 10 kHz 보다 크거나 같게 설정함으로써 측정값의 과소 평가를 방지한다. 이렇게 얻은 값에 $\sqrt{SCS/RBW}$ 를 곱하여 RE 당 SSB의 측정값을 얻는다. 스펙트럼 분석기를 이용한 방법은 기존의 스펙트럼 분석기를 가지고 측정이 가능한 장점을 지니지만, 제로스팬의 기능을 이용하여 시간 영역에서의 측정으로 인해서 SSB의 신호가 트래픽의 신호에 비해서 작거나 같게 될 경우에는 각 신호를 구분하기가 어렵다. 이를 극복하기 위해서 IEC 표준에서는 후처리를 통한 SSB 매핑이나 SSB 게이팅을 통하여 트래픽 신호와 SSB 신호를 구분하여 측정하도록 하고 있다. 그림 6은 스펙트럼 분석기로 측정하였을 때 트래픽 신호와 SSB 신호가 시간 축에 존재하는 결과를 보여준다. 그림 6에서 보듯이 SSB의 신호가 트래픽 신호에 비해서 크다면 SSB의 레벨을 정상적으로 얻을 수 있으나, SSB의 신호가 트래픽에 비해서 작거나 같게 되면, SSB의 신호 크

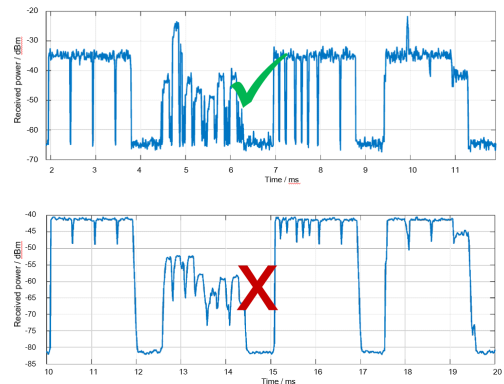


그림 6. 스펙트럼 분석기를 이용한 측정 사례
Fig. 6. Measurement example using spectrum analysis.

기를 얻을 수 없음을 보여준다. 하지만, 표준에서 제시된 SSB 매핑이나 SSB 게이팅 방법을 통해 SSB만의 신호를 구분하여 측정이 가능하다. 그러나, 이를 위해서는 SSB 매핑을 위한 별도의 프로그램을 구축하거나, 게이팅 기능이 포함된 스펙트럼 분석기로만 측정이 가능하다. 또한, 시간 영역에서의 측정이기 때문에 스펙트럼 분석기를 이용한 방식의 측정은 동일한 SSB 주파수 대역을 사용하는 통신사의 여러 기지국으로부터의 신호에 대한 구분은 불가능하다. 따라서, 이 방법은 EMF 평가를 위한 기존의 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정 가능한 장점도 있지만, 별도의 기능을 포함하여야 하며, 특히, 해당 주파수 대역에 들어오는 모든 신호에 대해서 측정이 이루어지기 때문에 여러 기지국이 존재하는 환경 평가는 가능하지만, 특정 기지국의 신호를 별도로 분리하여 EMF 평가는 어렵다는 문제가 있다.

3-2 디코더를 이용한 방법

디코더를 이용한 방식은 5G NR PBCH의 SSS 신호를 복호하여 E_{SSB} 를 구한 다음에 환산계수를 곱하여 최대 전 기장의 값을 구한다. 제 II장에서 기술한 바와 같이 5G NR에서는 빔 스위핑을 하기 때문에, 측정 장치의 방향으로 수신되는 빔을 선택하고, 이 빔의 SSS 신호를 찾아야 한다. 그림 2에서 보듯이 SSB의 대역폭은 $240 \times \Delta f$ 이다. 여기에서 Δf 는 부반송파 간격을 나타낸다. FR1을 사용하는 5G NR의 SSS 신호는 부반송파의 간격이 15 kHz인 경우에는 SSB의 대역폭이 3.6 MHz($15 \text{ kHz} \times 240 = 3.6 \text{ MHz}$)이고, SCS가 30 kHz인 경우에는 SSB 대역폭이 7.2 MHz이다. 이 중에서 PSS 신호는 기지국의 3개의 sector 중 하나를 나타내는 신호로, 5G NR이 핫스팟 지역에 설치되는 경우에 주변의 기지국으로부터 동시에 들어오는 PSS 신호가 여러 개가 존재할 수 있기 때문에 기준신호로 채택하기에는 적합하지 않다. 더욱이 PSS 신호는 시간 영역에서 신호를 검출한다. PSS 신호를 검출한 다음에는 측정기와 기지국 사이에서 발생하는 주파수 오프셋을 제거하여야 한다. PSS 신호의 검출을 통하여 시간 동기화를 맞췄기 때문에 SSS 신호는 주파수 영역에서 처리가 가능하다. 이와 같은 과정을 거쳐서 PCI(physical cell ID)의 값을 식 (2)로부터 구한다.

$$N_{\text{cellID}} = 3N_{\text{ID}}^{(1)} + N_{\text{ID}}^{(2)} \quad (2)$$

여기에서 $N_{\text{ID}}^{(1)}$ 은 각 기지국에 부여된 고유의 SSS 번호이다. 특히 SSS 신호는 표 2와 같이 길이가 127개인 골드 코드로 구성되어 있다. SSS 신호는 섹터별로 0부터 335 사이의 값을 가진다. 따라서 SSS 신호의 종류는 $3 \times 336 = 1,008$ 개이다. 그리고 $N_{\text{ID}}^{(2)}$ PSS 신호를 나타내고, $\{0, 1, 2\}$ 와 같이 3개의 값을 갖는다. 그림 7은 이러한 처리과정을 나타낸다.

PSS 신호는 127개의 SCS, 즉 그림 7에서 SC#56부터 SC#182에 maximal-length PN(pseudo noise) 시퀀스를 실어 보낸다. 3GPP TS 38.211에 규정된 PSS 시퀀스는 식 (3)으로 정의된다.

$$d_{\text{PSS}}(n) = 1 - 2x(m) \quad (3)$$

여기에서 $m = (n + 43N_{\text{ID}}^{\text{cell}}) \bmod 127$ 이고, $N_{\text{cellID}} = 3N_{\text{ID}}^{(1)} + N_{\text{ID}}^{(2)}$, $0 \leq n < 127$ 이다. 그리고 $x(i+7) = (x(i+4) + x(i)) \bmod 2$ 이고, 메모리의 초기값은 $[x(6) \ x(5) \ x(4) \ x(3) \ x(2) \ x(1) \ x(0)] = [1110110]$ 이다. SSS 신호는 sector 당 336개의 골드 시퀀스로 구성되는 셀 고유의 ID 그룹이다. 따라서 5G NR은 1,008개의 PCI를 지원한다. SSS 신호는 식 (4)로 표시된다.

$$d_{\text{SSS}}(n) = [1 - 2x_0([n + m_0] \bmod 127)] \times [1 - 2x_1([n + m_1] \bmod 127)] \quad (4)$$

여기에서 m_0 와 m_1 는 식 (5)와 식 (6)으로 얻는다.

$$m_0 = 15 \left[N_{\text{ID}}^{(1)} / 112 \right] + 5N_{\text{ID}}^{(2)} \quad (5)$$

$$m_1 = N_{\text{ID}}^{(1)} \bmod 112, \quad 0 \leq n < 127 \quad (6)$$

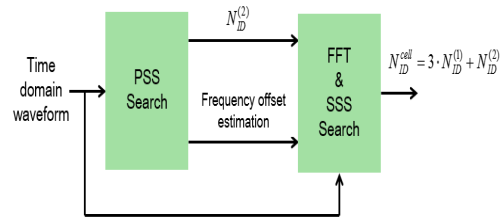


그림 7. PSS와 SSS 신호의 검출 과정

Fig. 7. Detection process of PSS and SSS.

또한 $x_0(i+7) = [x_0(i+4) + x_0(i)] \bmod 2$ 이고, $x_1(i+7) = [x_1(i+4) + x_1(i)] \bmod 2$ 이다. 그리고 $[x_0(6) x_0(5) x_0(4) x_0(3) x_0(2) x_0(1) x_0(0)] = [0000001]$ 이고, $[x_1(6) x_1(5) x_1(4) x_1(3) x_1(2) x_1(1) x_1(0)] = [0000001]$ 이다. m_0 와 m_1 는 식 (5)와 식 (6)으로부터 $N_{ID}^{(1)}$ 와 $N_{ID}^{(2)}$ 의 값에 따라 표 4와 같이 구할 수 있다. SSS의 개수는 총 1,008개의 시퀀스가 된다.

PBCH 페이로드는 32 bits로 24 bits의 MIB(master information block) 정보, SFN의 LSB(4 bits), 하프 프레임 비트(1 bit), 그리고 SS/PBCH 블록 인덱스(6th, 5th, 4th)로 구성된다. 이 정보를 복조할 수 있는 PBCH-DMRS를 PBCH 내에 같이 보낸다. PBCH-DMRS 신호는 식 (7)과 같이 복소수 형태의 PN 시퀀스 신호이다.

$$r(m) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m)) + j \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m+1)) \quad (7)$$

여기에서 $c(n) = (x_1(n + N_c) + x_2(n + N_c)) \bmod 2$ 이고, $x_1(n+31) = (x_1(n+3) + x_1(n)) \bmod 2$, 그리고 $x_2(n+31) = (x_2(n+3) + x_2(n+2) + x_2(n+1) + x_2(n)) \bmod 2$ 이다. 한편, PN 시퀀스 생성기의 초기값은 $c_{\infty} = 2^{11}(\bar{i}_{SSB} + 1) ([N_{ID}^{cell}/4] + 1) + 2^6(\bar{i}_{SSB} + 1) + (N_{ID}^{cell} \bmod 4)$ 이다. 여기에서 $\bar{i}_{SSB} = i_{SSB} + 4 \cdot n_{hf}$ 이고, i_{SSB} 와 n_{hf} 는 식 (8) 및 식 (9)와 같다.

표 4. SSS 신호
Table 4. SSS signal.

$[N_{ID}^{(1)}/112]$	$N_{ID}^{(2)}$	$m_1 \backslash m_0$	0	1	2	3	...	111
0	0	0	0	1	2	3	...	111
	1	5	0	1	2	3	...	111
	2	10	0	1	2	3	...	111
1	0	15	0	1	2	3	...	111
	1	20	0	1	2	3	...	111
	2	25	0	1	2	3	...	111
2	0	30	0	1	2	3	...	111
	1	35	0	1	2	3	...	111
	2	40	0	1	2	3	...	111

$$i_{SSB} = \begin{cases} i_{SSB} & \text{when } L_{\max} = 4 \\ i_{SSB} & \text{when } L_{\max} = 8 \text{ or } 64 \end{cases} \begin{cases} 2 \text{ LSB of SS/PBCH block} \\ 3 \text{ LSB of SS/PBCH block} \end{cases} \quad (8)$$

$$n_{hf} = \begin{cases} n_{hf} & \text{when } L_{\max} = 4 \\ n_{hf} & \text{when } L_{\max} = 8 \text{ or } 64 \end{cases} \begin{cases} 0, \text{ for the first half frame} \\ 1, \text{ for the first half frame} \\ 0, \text{ always} \end{cases} \quad (9)$$

이상 설명한 바와 같이 SS/PBCH 블록에서 신뢰성이 높게 전기장을 구할 수 있는 신호는 SSS 신호와 PBCH-DMRS 신호이다. PSS는 기지국의 3개의 sector 중의 하나를 나타내기 때문에 주변 기지국의 영향을 받을 수 있을 뿐만 아니라, PSS 신호는 시간 영역에서 검출해야 한다. 반면에 SSS는 1,008개의 경우의 수가 존재하여 주변의 기지국의 영향을 받지 않을 뿐만 아니라, 주파수 영역에서 신호를 검출하므로 안정적으로 값을 얻을 수 있다. 한편, PBCH-DMRS 신호도 골드 코드로 된 복소수 형태의 PN 시퀀스이기 때문에 PBCH-DMRS 신호로부터 안정된 전기장을 얻을 수 있다. 다만, PBCH는 PCI에 따라 위치가 달라질 뿐만 아니라, 3개의 OFDM 심볼에서 144개의 PBCH-DMRS 신호를 얻어야 한다.

IV. 5G NR의 EMF 측정 사례 분석 및 제안

4-1 스펙트럼 분석기 방법과 디코더 방법에 대한 측정결과 비교

제 II장에서 기술한 바와 같이 5G NR 기지국의 신호는 제공하는 서비스에 따라 트래픽의 시간적인 변화가 심하다. 따라서 전체 신호를 측정하는 것은 측정할 때마다 측정값이 달라지기 때문에 측정의 불확도가 매우 크다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 IEC에서는 5G NR의 always-on 신호인 SS/PBCH 신호를 추출하여 측정할 것을 권고하고 있다^[6]. 본 장에서는 제 III장에서 검토한 스펙트럼 분석기를 이용한 방법과 디코더를 이용한 방법을 이용하여 동일한 사이트에서 E_{SSB} 를 추출하여 EMF를 측정된 결과를 분석하고, 개선방안을 제안하고자 한다. 5G NR EMF 측정 분석을 위해서 단수 셀이 존재하는 A 사이트 그룹과 복수 셀이 존재하는 B 사이트 그룹으로 구분하여 디코더 방법과 스펙트럼 분석기 방법을 이용하여 각각 측정을 수행하였다. 그림 8은 현재 운용 중인 A 사

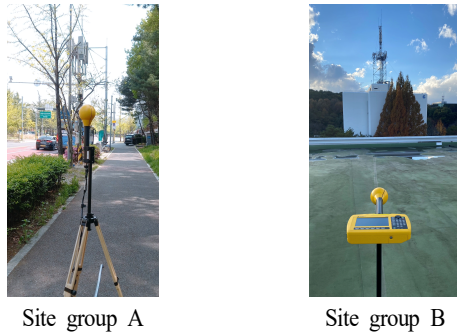


그림 8. 5G NR 기지국 안테나의 EMF 측정
Fig. 8. Photograph of the EMF measurement from 5G NR base station antenna.

이트 그룹과 B 사이트 그룹 기지국에 대한 측정을 보여 준다. 측정 장비는 디코더와 스펙트럼 분석 기능을 모두 가지고 있는 NARDA SRM-3006 장비를 사용하였으며, 일반적으로 A 사이트 그룹은 단수 셀이 존재하는 지역으로 신호가 강하게 나타나며, B 사이트 그룹은 복수 셀이 존재하는 지역으로 비교적 신호는 약하지만 측정하고자 하는 특정 셀 이외의 셀 신호가 존재하는 기지국에 대한 측정사례이다.

표 5는 5G NR EMF 측정 결과를 나타낸 것이다. 측정 결과에 적용된 환산 계수는 $F_{extBeam}$ 은 트래픽과 브로드캐스트 빔의 이득이 동일한 경우인 1을 적용하고, F_{BW} 는 부반송파 주파수 30 kHz와 전체 전송 주파수 100 MHz의 비율인 3,276을 적용한다. 한편, F_{PR} 은 최대 전력을 감안하여 전력 감소 계수 1을 적용하며, F_{TDC} 는 국내 통신사 프레임 포맷을 적용하여 다운링크와 업링크의 비율 0.743을 적용하였다. 다양한 사이트에서의 측정 결과와 평가 결과를 보여준다. 예를 들어, A1 사이트에서 디코더를 이용한 RE당 SSB의 전기장 강도는 0.2388 V/m이며, 식 (1)을 이용하여 최대 노출 전기장 강도를 산출하면 11.78 V/m이 된다. 반면, 스펙트럼 분석기를 이용한 A1 사이트에서의 측정된 E_{SSB} 는 0.429 V/m이며, 식 (1)을 적용한 최대 노출 전기장 강도를 계산하면 21.18 V/m이다. 한편, B1 사이트의 경우, 디코더를 이용한 최대 노출 전기장 강도는 1.85 V/m이며, 스펙트럼 분석기를 이용한 최대 노출 전기장 강도는 4.83 V/m이다.

디코더를 이용한 방법과 스펙트럼 분석기를 이용한 방

표 5. 5G NR EMF 측정 결과

Table 5. Results of 5G NR EMF measurement.

Site	Eval. method	Measured E_{SSB} [V/m]	Extrapolation factor				E_{asmt} [V/m]
		E_{SSB}	$F_{extBeam}$	F_{BW}	F_{PR}	F_{TDC}	E_{asmt}
Site group A	A1	Decoder	1	3276	1	0.743	11.78
		Spectrum					21.18
	A2	Decoder					11.19
		Spectrum					20.81
	A3	Decoder					4.37
		Spectrum					8.79
Site group B	B1	Decoder	1	3276	1	0.743	1.85
		Spectrum					4.83
	B2	Decoder					0.99
		Spectrum					2.56
	B3	Decoder					1.29
		Spectrum					3.36

법의 측정 결과를 비교하면, 단수 셀이 존재하는 기지국에서 스펙트럼 분석기를 이용한 측정값이 디코더를 이용한 방법에 비해 대략 1.8~2.0배 높게 나타나는 것을 알 수 있고, 복수 셀이 존재하는 기지국에서는 대략 2.5~2.6배 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 다수의 셀로부터 방사되는 전력을 스펙트럼 분석기를 이용한 방법은 구분하기 어렵고, 수신된 모든 값을 측정하기 때문이다. 또한, 측정할 때 마다 결과값이 변화가 디코더 방식에 비해 클 것으로 예상된다.

4.2 기지국 전자파의 적합성 평가를 위한 디코더 방법 제안

디코더를 이용한 방법에는 SSS 신호를 측정하는 방법, PBCH-DMRS 신호를 측정하는 방법, 그리고 CSI-RS(channel state information reference signal) 신호를 측정하는 방법이 있다^[3]. 그러나 CSI-RS를 이용하는 방법은 CSI-RS 신호가 “always-on”이 아니므로 측정 대상에서 제외된다. 따라서 전기장 측정을 위한 기준신호로는 SSS 신호와 PBCH-DMRS로 한정된다. 제 III장에서 검토한 바와 같이 SSS 신호는 섹터별로 336개의 종류가 있기 때문에 동일한 SSS가 주변에 있을 확률이 매우 낮다. 따라서 SSS 신호를 전기장 측정의 기준신호로 선택하는 것이 가장 합리적이

다. 3GPP TS 38.215에서도 사용자가 기지국의 수신 전력을 측정할 때 SSS 신호를 사용하여 측정하도록 규정되어 있고, PBCH-DMRS 신호나 CSI-RS 신호를 선택적으로 사용할 수 있다고 규정하고 있다^[10].

한편, IEC 62232에서 언급한 바와 같이 셀 ID를 구분하여 측정 가능한 것이 단지 SSS 신호를 디코딩 하는 방법으로 따라서 기지국에 대한 적합성 평가를 위해서는 IEC 62232에서 규정한 E_{SSB} 신호를 전기장 측정의 기준신호로 사용하기보다는 좀 더 신뢰성이 높은 신호, 즉 SSS 신호를 선택하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 기지국에 대한 적합성 평가를 위해 식 (10)을 주된(primary) 측정방법으로 제안한다. 그리고 선택사항으로 식 (11)과 식 (12)를 제안한다.

$$E_{esmt} = E_{SSS} \cdot \sqrt{F_{extBcem} \cdot F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC}} \quad (10)$$

$$E_{esmt} = E_{PBCH-DMRS} \cdot \sqrt{F_{extBcem} \cdot F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC}} \quad (11)$$

$$E_{esmt} = E_{(SSS+PBCH-DMRS)/2} \cdot \sqrt{F_{extBcem} \cdot F_{BW} \cdot F_{PR} \cdot F_{TDC}} \quad (12)$$

실제로 $E_{PBCH-DMRS}$ 방식은 E_{SSS} 방식에 비해 구현이 복잡한 대신에 PBCH-DMRS의 길이가 144이므로 신뢰성이 약간 높아지고, $(E_{PBCH-DMRS} + E_{SSS})/2$ 방식은 측정에 사용된 데이터의 수가 271(127+144)개가 되므로 신뢰성이 더욱 좋아진다. 그러나 3GPP에서도 SSS 신호를 신호 품질 측정의 의무(mandatory) 신호로 규정하고 있고, PBCH-DMRS를 선택사항으로 규정하고 있으므로 이를 준용하는 것이 바람직하다.

앞서 살펴본 바와 같이 IEC TC106의 IEC 62232에서 5G NR EMF 평가를 위한 방법으로 디코더를 이용한 방법과 스펙트럼 분석기를 이용한 방법을 제안하고 있으며, 국내에서도 전자파강도 측정기준 고시에서도 IEC에 제안된 방법을 토대로 두 가지 모두를 반영하였다. 그러나 표 5의 결과에서와 같이 디코더를 이용한 방법과 스펙트럼 분석기를 이용한 방법의 측정결과와 차이가 나타나는데, 전파법의 의한 무선국의 전자파강도 측정 보고를 위한 실제 측정현장에서는 주로 스펙트럼 분석기를 이용한 방법이 활용되고 있다. 이는 기지국을 신설했을 때, 주변 기지국의 영향을 고려하여 보수적으로 worst case 상황을 측정

하는 것이 근본적인 전자파 인체보호를 위해서는 바람직하지만, 측정하고자 하는 지점에서의 *In-Situ* 측정 개념이 포함되어 있다. 반면, 신설 기지국으로부터 방출되는 전자파 강도를 측정하여 등급 및 측정값을 보고하는 적합성 평가에서는 과평가될 수 있기 때문에, 항상 일정한 세기 신호인 SS/PBCH 신호를 측정하고, 이로부터 환산계수를 적용하여 최대 노출 평가가 이루어지는 디코더를 이용한 방법이 더 적절할 것이다. 그러므로 본 논문에서는 측정 목적에 따라 구분하여 특정 지점의 환경 평가를 위한 *In-Situ* 평가에서는 스펙트럼 분석기를 이용한 방법으로 측정하며, 특정 기지국의 전자파인체노출 적합성 평가, 즉 전파법의 전자파강도 측정결과 보고 의무나 등급 표시를 위한 평가의 경우는 디코더를 이용한 방법으로 측정하는 것을 제안하고자 한다.

V. 결 론

5G NR의 탄생과 함께 밀리미터파 대역의 경로 손실을 보상하기 위하여 능동 안테나 시스템 기술이 사용되고 있다. 능동 안테나 시스템 방식의 기지국은 OTA 방식으로 EMF를 측정을 해야 한다. 그런데 5G NR은 다양한 서비스를 수용하는 구조이므로 트래픽에 따라 기지국의 송출 신호의 변화가 매우 심하다. 따라서 기지국의 EMF를 측정하기 위해서는 먼저 “always-on” 신호이면서 트래픽에 따라 영향을 받지 않는 신호를 추출하여 측정해야 한다. 기지국에서는 SS/PBCH block이 “always-on” 신호이고, 이 중에서도 SSS 신호가 주변 기지국의 영향을 받지 않으면서 안정적으로 측정할 수 있다. 이동통신 기지국의 EMF 측정 방법은 디코더를 이용한 방법과 스펙트럼 분석기를 이용한 방법이 있다. 스펙트럼 분석기를 이용한 방법은 트래픽 신호와 SSB를 구분해야 할 뿐만 아니라, 주변에서 들어오는 모든 신호가 혼합되어 측정되는 단점이 있다. 반면에, 디코더를 이용한 방법은 측정하고자 하는 기지국의 EMF를 안정적으로 측정할 수 있다. SS/PBCH 블록의 SSS 신호를 측정하기 때문에 측정을 하고자 하는 기지국의 E_{SSB} 를 신뢰성이 높게 측정할 수 있다. 이 값에 환산계수를 곱하여 최대 EMF 노출값을 얻는다.

따라서 본 논문에서는 국내 5G NR 기지국의 전자파

노출량 평가에 있어서 목적에 따라 구분하여, *In-Situ* 측정에서는 스펙트럼 분석기를 이용하는 방법으로 측정하고, 특정 기지국의 적합성 평가에서는 디코더를 이용한 방법 즉 SSB 블록의 SSS 신호로부터 전기장을 구하고, 환산계수를 곱하여 5G NR 기지국의 전자기장 강도를 구하는 방식을 주된 측정방법으로 제안한다. 한편, 선택사항으로는 PBCH-DMRS 신호로부터 EMF값을 측정하는 방안과 SSS 신호와 DMRS 신호의 평균값을 사용하는 방안을 제안한다.

References

- [1] ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields(100 kHz to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 118, no. 5, pp. 483-524, May. 2020.
- [2] *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*, IEEE Std C95.1, Oct. 2019.
- [3] *Determination of RF Field Strength, Power Density and*

SAR in the Vicinity of Radiocommunication Base Stations for the Purpose of Evaluating Human Exposure, IEC 62232, Aug. 2017.

- [4] *IMT Vision-Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond*, Recommendation ITU-R M.2083-0, Sep. 2015.
- [5] *5G NR: Physical Channels and Modulation*, ETSI TS 138 211, version 15.2.0, Jul. 2018.
- [6] M. Kottkamp, A. Pandey, D. Raddino, A. Roessler, and R. Stuhlfauth, *5G New Radio: Fundamentals, Procedures, Testing Aspects*, Rhode & Schwarz, Munich, 2019.
- [7] *5G NR: Physical Layer Procedures for Control*, ETSI TS 138 213, version 15.6.0, Jul. 2019.
- [8] Sharetechnote, "5G/NR-SS block," Available: http://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_SS_Block.html
- [9] M. Mike, *EMF Measurements in 5G NR*, Munich, Rohde & Schwarz, May. 2020.
- [10] *5G NR: Physical Layer Measurements*, ETSI TS 138 215, version 15.2.0, Jul. 2018.

김 창 주 [(주)휴라/수석연구위원]

<https://orcid.org/0000-0002-3689-8137>



1980년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)

1988년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)

1993년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)

1979년 12월~1983년 3월: ADD 연구원

1983년 3월~2018년 12월: ETRI 책임연구원

1994년 3월~1998년 12월: ETRI 전파신호처리연구실장

1999년 1월~2001년 4월: ETRI 이동통신모뎀연구부장

2003년 2월~2010년 12월: ETRI 전파기술연구부장

2018년 12월~2021년 12월: ETRI 연구전문위원

2019년 3월~2022년 2월: 한동대학교 전산전자공학부 초빙교수

2022년 3월~현재: (주)휴라 수석연구위원

[주 관심분야] 이동통신, 무선통신, 인지무선, 전파기술 등

전 상 봉 [한국전자통신연구원/책임연구위원]

<https://orcid.org/0000-0001-8059-9700>



2001년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)

2003년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)

2007년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학박사)

2008년 6월~2010년 9월: 한국전파진흥협

회 EMC기술지원센터

2010년 10월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

[주 관심분야] 전자기 인체 노출 평가, EMI/EMC 측정 및 대책

최 형 도 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2652-7524>



1986년 2월: 고려대학교 재료공학과 (공학사)

1989년 2월: 고려대학교 재료공학과 (공학석사)

1996년 8월: 고려대학교 재료공학과 (공학박사)

2004년 6월 ~ 2005년 12월: 한국전파진흥협회 부설 EMC 기술지원센터장

2008년 7월 ~ 2009년 7월: SDSU 전기·컴퓨터공학과 방문교수

2000년 10월 ~ 2013년 12월: 한국전자통신연구원 전자파환경연구실장

2014년 1월 ~ 2016년 12월: 한국전자통신연구원 전파기술연구부장

1997년 1월 ~ 현재: 한국전자통신연구원 전파위성연구본부 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 인체 노출 평가, 전자파 인체보호 정책, 전자파 저감 소재 및 부품, 전파기술 등