

휴대용 무선 통신기기의 EMF 인체영향 평가 수치해석 평가 표준화 및 기술 동향

이순용 전파자원 프로젝트그룹(PG901) 위원, 삼성전자 글로벌기술센터,
권혁춘 전파자원 프로젝트그룹(PG901) 부의장, 삼성전자 Samsung Research

1. 머리말

무선통신이 빠른 속도로 발전하며 LTE, WLAN, 5G통신 기술이 많은 주목을 받았다. 또한 스마트폰, 태블릿과 같은 휴대용 무선 단말기가 보급되어 전자파 사용이 날로 증가 중이다. 특히 5G가 상용화되어 신규 주파수의 전자파 사용이 확대되고 있다.

전자파는 무선통신 산업에 없어서는 안 될 필수자원이다. 하지만 동시에 인체에 대한 유해성 문제가 항상 따라다녀 이를 해소하는 것이 전 세계의 공통 이슈이다. 전자파의 인체영향은 주파수에 따라 다른 물리량으로 측정되고 평가된다. 국제인체보호기준(ICNIRP)을 보면 100kHz ~ 10GHz에서 전자파에 노출된 인체의 기본한계를 전자파 흡수율(SAR, Specific Absorption Rate)로 정의하는 한편, 10GHz 이상에서는 전력밀도(PD, Power Density)를 기본한계로 설정하여 인체보호기준을 마련하고 있다[1]. 전 세계적으로 휴대용 무선통신기기들은 이러한 전자파 인체보호기준을 만족해야만 인증을 받아 제품을 출시할 수 있다.

하지만 전자파 인체보호기준 적합성 평가는 제품이 제작된 이후에나 가능하다. 또한 휴대용 무선통신기기가 사용하는 주파수 대역의 증가 및 CA(Carrier Aggregation) 기술 등으로 인해 주파수 운용이 복잡해져 실제 인증시험 시간이 증가하여 제품 인증에 어려움이 많다. 특히 mmWave 초고주파 대역(예를 들어 국내: 28GHz, 미국: 28GHz 및 39GHz)을 사용하는 5G 상용 단말의 경우에는 초고주파의 사용으로 저하되는 안테나 이득을 보완하고자 Beam forming 및 Beam steering 기능을 사용한다. 이는 인증 관점에서 평가해야 하는 시험의 수를 기하급수적으로 증가시키는 상황을 초래했다.

이러한 문제를 해결하고자 수치해석을 기반으로 SAR과 PD를 평가하고 검증하는 방법에 대한 표준 제정/개정이 진행되고 있다. 국내에서도 수치해석을 기반으로 전자파 인체 노출량을 평가(EMF, Electromagnetic Fields)하고 검증하는 방법이 산업표준으로 제정된 바 있다[2]. 본고에서는 수치해석 기반 휴대용 무선통신기기의 EMF 인체영향 평가에 대한 국제 표준인 IEC 표준동향을 살펴본다. 또한 이를 바탕으로 산업표준으로 만들어진 기술에 대해서 알아보려고 한다.

2. IEC 전자파 인체 노출량 표준화 동향

2.1 EMF 수치해석 표준화 개관

IEC(국제전기기술위원회, International Electrotechnical Commission) 산하 TC(기술위원회, Technical Committee) 106에서는 300GHz 주파수 범위까지의 휴대전화, 기지국, 방송 송신기,

전자기기 등 다양한 전자파 발생 장비에 의한 전자파 인체 노출량 평가 표준을 측정과 수치 해석 측면에 따라 개발한다. 특히 6GHz 이하 대역을 주로 사용해왔던 이동통신용 휴대단말의 경우 앞서 언급했듯이 SAR을 평가기준으로 정하고 있어 이를 위한 평가방법의 표준규격을 개정하는 중이다. 최근 들어서는 휴대단말의 경우 6GHz 이하의 대역 (LTE 대역, 5G NR FR1 대역, WiFi 2.4GHz/5GHz/6GHz 등)을 지원하는 기술들이 탑재되고, 6GHz 이상 대역(28GHz, 39GHz, 60GHz 등)을 이용하는 기술들이 속속 출현했다. 따라서 전자파 인체 노출량 평가가 점점 복잡해지면서 수치 해석에 대한 표준의 필요성이 점점 강조되고 있다. 수치해석 표준을 반영한 수치해석 도구를 통해 휴대단말의 전자파 복사 성능을 검증할 수 있다. 또한 실제 측정평가에 사용되는 다양한 인체모형(머리, 몸통, 사지 등)에 대한 전자파 인체 노출량을 더 쉽고 빠르게 예측하고 검증할 수 있다. 다만 수치해석을 통해 더 신뢰할 수 있는 전자파 인체 노출량 평가를 위해서는 측정 기반의 평가방법 표준과 수치해석 기반의 평가방법 표준의 상호검증이 이루어져야 하며, 상호 보완하는 통합 표준 개발이 필요하다.

휴대단말을 위한 대표적인 수치해석 분석으로 IEC 62704시리즈 표준, 62704-1/-2/-3/-4 개발이 완료되었다. IEC 62704-1은 FDTD 알고리즘을 이용한 SAR 수치해석에 대한 기본 정의, IEC 62704-2는 자동차에 적용된 안테나의 SAR 수치해석, IEC 62704-3은 휴대단말에 적용하는 SAR 수치해석, IEC 62704-4는 FEM 알고리즘을 이용한 SAR 수치해석 표준이다. IEC 62704-1/-2/-3/-4는 2020년 10월 IEC 62704-4를 마지막으로 모두 발간이 완료되었다. 또한 가장 최근에는 앞서 언급했던 PD 평가를 위한 수치해석 표준, IEC/IEEE 63195-2가 JWG 11 표준 개발 그룹에서 개발이 한창이다.

측정평가의 경우 계측장비의 불확도를 정의/선언하고 실제 인증시험이 가능하다. 하지만 수치해석의 경우에는 평가대상 기기의 근거리장 및 원거리장 영역에서의 고유특성을 고려하여 기기를 모델링해야 한다. 또한 이를 반영한 불확도를 정의해야 하기에 앞서 언급하였듯이 측정표준과 수치해석표준이 병행 개발될 필요가 있어 현재 동일한 개발 일정으로 IEC/IEEE 63195-1 측정 표준과 함께 개발 중이다. 또한 서두에서도 언급했듯이 초고주파, 특히 mmWave를 이용한 5G 통신 표준(3GPP 5GNR FR2)의 개발이 완료되고, 이 기술을 이용한 단말을 시장에 출시하기 위해 제품 개발을 추진하는 중에 전자파 인체 노출량 평가를 기존 6GHz 대역 이하에서 사용하던 SAR이 아닌 PD평가지표가 국가의 전자파 인체 노출량 규제로서 신규 도입되었다. 이에 따라 휴대단말을 PD평가방법으로 시험해야 할 필요성이 대두됨에 따라 IEC에서는 2017년부터 관련 연구를 시작하여 표준을 개발해 오고 있다. 현재 IEC에서는 IEC 63195-1 및 63195-2시리즈로 나누어 진행 중인 표준이 2021년 5월에 발간을 앞두고 있다.

2.2 IEC/IEEE 63195-1 표준 및 IEC/IEEE 63195-2 표준 동향

본 절에서는 근래 이슈가 된 mmWave 초고주파의 PD 평가방법으로 수치해석의 적용 필요성 및 표준화 추진동향을 살펴보고자 한다. 5G 통신의 경우 대용량 MIMO(Multiple Input Multiple Output), Beam forming 기술 등 다양한 RF 및 안테나 기술이 접목되어 사용된다. 특히 복사특성을 좌우하는 안테나는 배열(Array) 구조를 사용해야 한다. 이로 인해 Beam forming 및 Beam steering이 가능해져 평가를 위해 개별 Beam의 전자파 인체 노출량 평가

지표인 PD를 실제 측정으로부터 Worst Case를 찾아내는 것은 상당한 제약이 있다. 이에 수치해석을 병행하여 진행하지 않는다면 평가에 상당히 많은 시간이 소요될 것으로 우려된다. 이러한 문제 때문에 IEC 표준에서는 Worst Case를 정의하고, 도출된 Worst Case를 표준화된 측정 방법으로 검증할 수 있도록 측정절차 표준을 개발하는 중이다.

2019년 12월, 수치해석과 관련된 IEC/IEEE 63195-2 ED1의 위원회 초안(CD) 문서가 완성되었다. 이는 PD 평가방법 및 검증된 소프트웨어 선택, 테스트 구성의 정의, 수치해석을 위한 DUT 모델의 개발 및 검증, 측정 불확정도 등을 평가하는 절차를 포함하여 구성되어 있다. 현재는 최종 표준규격(IS)을 위한 마무리 작업 중이다. 더 구체적으로 측정평가와의 상호검증을 위한 Power Normalization, 안테나 구조를 고려한 Massive MIMO 안테나 구조 및 Sub-Array 안테나 모듈로 구성된 PD의 평가, 다양한 Beam code에 의한 Beam forming 특성을 고려한 평가방법 그리고 실측환경에서 평가하기 어려운 Worst case 평가조건의 정의 등을 다룬다. 마지막으로 이와 관련된 DUT의 설계검증까지 포함한다. 그중에서도 측정평가의 비교검증이 반드시 필요하며, 신뢰성 확보 차원에서 현재 측정평가 장비와의 상호검증을 위한 표준작업이 필수적이다. 특히나 초고주파의 PD 평가는 수치해석과 실측이 동시에 진행되어야 한다. 이에 JWG12에서 개발 중인 IEC/IEEE 63195-1과 같은 개발 일정으로 발간을 준비하는 중이다. 더불어 현재 논의 중인 사항으로는 수치해석 방법을 사용하여 다양한 복사 조건을 가지는 배열 안테나의 최대출력 및 전자파 인체 노출량의 Worst Case를 분석하는 것이 있다. 또한 실측을 진행하여 PD 값을 비교/분석하며 이에 대한 유효성을 평가하는 중에 있다. 이와 같은 평가기술이 적용된다면, 전자파 인체 노출량 평가 측면에서 좀 더 유연성을 가질 수 있을 것이다. 다음은 앞에 언급된 표준에 기반하여 평가에 활용할 경우, Beam forming 안테나의 효율적 테스트가 가능한 방법들을 사례를 통해 비교 분석하고 있다.

IEC 63195-1/-2 2개 표준은 앞서 언급했듯이 초기 표준개발그룹 설립단계부터 수치해석적 접근 및 실제측정으로 평가를 병행하고자 JWG11 및 JWG12 표준 개발그룹 간 협력을 통해 상호 보완적인 표준작업을 수행한다. 여기에는 상호 비교검증을 위한 실측 및 수치해석으로 도출되는 전자기장 값들의 상관성 확보를 위해 Reference 규정이 필수적이다. 실제측정 및 수치해석 모델링 시 후처리 알고리즘(평가형태, 평가크기, 평가면적 등)을 통해 얻어지는 PD 값들에 대한 편차를 최소화하는 것이 필요하다. 현재는 다양한 배열 안테나 타입(Patch, Dipole, 1×4 배열, 2×2 배열 등)의 샘플 기반으로 표준참여업체 간 Round Robin 테스트 및 수치해석 검증을 수행한다. IEC에서는 다음과 같은 Reference Point Model을 정의하고 이를 통한 Power Normalization 관점에서 PD 가이드를 제공한다.

3. 수치해석 기반 EMF 인체영향 평가

본 장에서는 국제표준개발과 동시에 산업표준으로 제안된 휴대용 무선통신기기의 전자파 인체 노출량 평가를 소개한다. 또한 SAR 및 PD 인증시험 효율화를 목적으로 수치해석적 접근 방법과 이에 대한 유효성 검증 방법을 제공할 것이다. 제시된 접근 방법은 30MHz ~ 300GHz 주파수 대역을 사용하는 휴대폰, 태블릿, 웨어러블 기기 등을 적용 대상으로 한다. 하지만 인체와의 거리가 200mm 이내에서 사용되는 모든 휴대용 무선통신기기에 적용 가능하며 측정 기

반의 전자파 인체 노출량 평가 방법을 보완하거나 효율화하기 위한 수단으로 활용할 수 있다.

3.1 수치해석 절차

휴대용 무선통신기기의 동작 주파수 대역(6GHz 이하 또는 6GHz 이상 대역) 별 상세 평가 방법 및 절차는 각각 IEC/IEEE 62704-3:2017과 IEC/IEEE 63195-2 ED1 규격을 참조한다.

3.2 전자파 흡수율(SAR) 계산 및 평균 방법

RF 노출 표준 및 지침에는 시간/전신 평균 SAR 한계 및 최대 공간평균 SAR 한계를 명시하며 이를 준수하도록 규정한다. 최대 공간평균 SAR은 일반적으로 머리, 몸통 또는 사지와 같은 입방체의 부피로 지정된 질량의 조직에 대해 평균화된다. 이에 대한 상세한 SAR 계산 및 평균 방법은 IEC/IEEE 62704-1:2017의 6.2를 참고한다.

또한 수치해석 시, SAR을 포함한 출력 값 계산은 부하로 전달되는 전력을 사용하여 수행된다. 실제 측정 값과 동일한 결과를 얻기 위해서는 부하에 전달되는 전력을 DUT의 실제 동작전력으로 조정할 필요가 있다. DUT 전력조정방법 및 절차는 IEC/IEEE 62704-1:2017의 6.3을 참고한다.

3.3 전력 밀도(PD) 분석 및 후 처리 절차

IEC/IEEE CD 63195-1/-2 ED1 규격을 참조하여 최대 공간평균 전력밀도(psPD) 분석을 위한 상세절차를 기술한다.

- 스캔면 설정: 피시험 기기로부터 전력밀도를 도출하고자 하는 평가 표면에 복사되는 전자파의 Field를 분석 가능하도록 충분한 스캔면(Scan area)을 설정한다(피시험기기와 평가 표면까지의 이격거리에 따라 스캔 면이 달라질 수 있다).
- 측정점 설정: 스캔면상 측정점 간 최소간격을 $\lambda/4$ 이하로 설정 한다(여기서 λ 는 피시험 기기 동작 주파수의 파장이며, 전체 측정점의 개수는 동작 주파수 및 스캔 면의 크기에 따라 결정된다).
- 공간평균 전력밀도(SAPD) 분석: 각 측정 점에서 도출된 E/H-field 벡터 값에 대하여 Normal 또는 Norm 벡터 기반 공간평균 전력밀도(SAPD)를 분석한다.
- 최대 공간평균 전력밀도(psPD) 도출: 스캔 면에서 도출된 공간평균 전력밀도(SAPD) 중 가장 높은 값을 중심으로 최대 공간평균 전력밀도를 평균하고자 하는 면적의 크기를 설정한 후 그 영역 안에 분포하는 각 측정 점의 값을 면적 평균한다. 여기서 평균화하고자 하는 면적은 원 또는 정사각형의 형태를 취할 수 있다.

3.4 수치 해석 유효성 검증

수치해석의 유효성은 3가지 방법으로 검증이 가능하다. 첫 번째는 평가하고자 하는 DUT의 복사특성 상관성을 분석하여 복사의 특성이 같음을 검증하는 방법이다. 두 번째는 근거리장 기반의 측정 결과와 상관성을 분석하는 방법이다. 세 번째 방법은 원거리장 기반의 측정결과와

상관성을 분석하는 방법이다. 단 SAR의 경우는 첫번째, 두 번째 방법이 유효하다. PD의 경우는 3가지 모두 해당된다.

3.4.1 복사 특성 상관성 분석

DUT 복사특성 분석은 SAR과 PD 특성의 상관성 분석에 앞서 DUT의 수치해석 오차를 줄이기 위해 필요하다. 복사특성 상관성 분석은 간단하게 DUT의 복사패턴 측정결과와 수치해석 결과 간 상관성 분석(peak gain, 1st null point, directivity 등)을 통해 가능하다. 피시험기기 복사특성이 정확히 모델링되지 않으면, 실제 DUT 복사특성이 실제와 다르게 해석되어 최종 SAR 및 PD 수치해석 결과와 차이가 발생 수 있다.

3.4.2 근거리장 기반 측정

근거리장 기반 SAR 측정은 IEC 62209-1/-2 표준 규격을 따라 측정한다. PD 측정은 E-field 및 H-field 직접 측정이 가능한 측정 장비를 사용하거나, E-field(또는 H-field) 직접 측정이 가능한 측정 장비를 사용하여 재구성(Reconstruction) 알고리즘을 통해 H-field(또는 E-field)를 분석하여 도출 가능하다. 이에 대한 상세방법 및 절차는 IEC/IEEE CD 63195-1 ED1 표준규격을 따른다.

3.4.3 원거리장 기반 측정

원거리장 기반의 상관성 분석은 PD만 가능하며, DUT의 복사전력(Radiated power)을 측정하여 상관성 분석이 가능하다. 측정 장비는 DUT의 동작 주파수 대역별 측정이 가능하도록 충분한 성능을 보장해야만 한다. DUT로부터 복사된 전력레벨(Power level)은 Power sensor가 연결된 Receiving reference antenna 또는 Probe로 측정할 수 있다. 피시험 기기의 복사 출력레벨은 Far-field friis equation으로부터 도출할 수 있으며 다음 수식(1)과 같다.

$$P_t \times G_t = 32.44 + 20 \log(D/100) + P_r + 20 \log(f) - G_r \text{ 수식(1)}$$

여기서 P_t : 피시험기기 송신 출력(dBm)

G_t : 피시험기기 안테나 이득(dBi)

D : 시험기기와 수신 안테나 사이의 측정 거리(cm)

P_r : 측정장비에서 측정된 수신 전력(dBm)

f : 동작주파수(GHz)

G_r : 수신 안테나 이득(dBi)

원거리장에서의 전력밀도는 수식(2)에 의해 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{원거리장 전력 밀도} = \frac{(P_t \times G_t)}{4\pi(D^2)} \text{ 수식(2)}$$

여기서 전력밀도 단위는 mW/cm^2 이며, $P_t \times G_t$ 는 mW , D 는 cm 이다.

단 DUT가 TDD(Time Division Duplexing)모드로 동작하는 경우, 듀티 싸이클에 대한 고려가 필요하며 이에 대한 PD는 듀티 사이클 Correlation Factor(CF)를 적용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{TDD 방식 기기 전력밀도} = \text{원거리장 전력밀도} + \text{CF 수식(3)}$$

여기서 전력밀도 단위는 dBm이며, Correlation factor의 단위는 dB이다.

3.4.4 측정과 수치해석 간 상관성 분석

SAR의 경우에는 동일한 근거리장 영역에서 도출된 값이므로 측정과 수치해석 간의 Hotspot의 위치 및 SAR값을 비교하여 상관성을 분석할 수 있다. PD의 경우에는 측정된 근거리장과 원거리장 영역의 PD를 수치해석에서 도출된 값과 비교하되 상관성을 분석하는 영역에 따라 다르다. 근거리장 측정의 경우에는 원거리장 영역 이전까지만, 원거리장 측정의 경우에는 원거리장 이후의 영역에서 상관성을 분석한다.

필요에 따라서 수치해석 및 측정결과를 정규화하여 비교할 수 있으며, 원거리장의 경우에는 측정하는 수신(Rx) 안테나 개구면의 크기에 따라서 평균면적을 설정하여 원거리장 PD를 비교해야 한다. 수치해석에서 평균면적이 측정 안테나 개구면의 크기와 유사할 때 상관성 분석에 오차를 줄일 수 있다.

4. 맺음말

본고에서는 IEC의 수치해석 전자파 인체 노출량 표준에 대해서 살펴보았다. 또한 이를 응용하여 활용 가능한 산업계 표준에 대해서 소개하였다. 무선통신기술의 고도화 및 주파수 이용이 많아지면서 휴대 단말의 전자파 인체 노출량 평가가 점점 복잡해지고 있어 측정평가방법 자체만으로는 한계와 어려움이 있다. 향후 더욱더 새로운 무선통신 기능이 적용될 생명 유지 및 이식 장치, 6G 통신단말과 무선통신기기의 동작 복잡성으로 인증기간의 증가가 수반됨으로 무선통신 산업계의 어려움이 예상된다.

이러한 어려움을 해결하기 위해서는 전자파 인체 노출량 측정 평가의 신규표준 제정이나 개정 그리고 이와 병행한 수치해석에 대한 표준이 필요하다. 수치해석 단독의 전자파 인체 노출량 평가에는 아직 해결해야 할 이슈들이 있다. 따라서 현재는 수치해석 기반의 평가가 상호 보완적인 수단으로 활용되지만, 향후 데이터가 축적되고 더 높은 신뢰성이 확보되어 수치해석 단독의 인증평가가 될 수 있기를 희망한다.

[참고문헌]

- [1] '5G 전자파와 인체영향', 최형도, 김남, 전자파학회지 전자파기술, 제29권, 제6호, 2018.
- [2] TTA.KO-06.0491, '휴대용 무선 통신 기기의 EMF 인체영향 평가 수치 해석 방법', 2019.
- [3] IEC TR63170: 2018, 'Measurement procedure for the evaluation of power density related to human exposure to radio frequency fields from wireless communication devices'

operating between 6GHz and 100GHz', 2018.

[4] IEC/IEEE CD 63195-1 ED1, 'Measurement procedure for the assessment of power density of human exposure to radio frequency fields from wireless devices operating in close proximity to the head and body – Frequency range of 6GHz to 300GHz', 2019.

[5] IEC/IEEE CD 63195-2 ED1, 'Determining the power density of the electromagnetic field associated with human exposure to wireless devices operating in close proximity to the head and body using computational techniques, 6GHz to 300GHz', 2019.

[6] IEC/IEEE 62209-1528 FDIS, 'Measurement procedure for the assessment of specific absorption rate of human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-worn wireless communication devices (frequency range of 4 MHz to 10GHz)', 2019.

[7] IEC/IEEE 62704-1:2017, 'Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30MHz to 6GHz- Part 1: General requirements for using the finite difference time domain(FDTD) method for SAR calculations', 2017.

[8] IEC/IEEE 62704-3:2017, 'Determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human body from wireless communications devices, 30MHz to 6GHz - Part 3: Specific requirements for using the finite difference time domain (FDTD) method for SAR calculations of mobile phones', 2017.

※ 출처: TTA 저널 제192호

(코로나 이슈로 각 표준화기구의 표준화회의가 연기·취소됨에 따라 TTA 저널로 대체합니다)