

무선주파수 펄스파 노출에 대한  
인체 영향 및 인체보호기준

이애경 외 9인

한국전자통신연구원

I. 서 론

본 논문은 과년도 <전자파 인체보호 활동 및 표준화 동향> 보고서<sup>[1]</sup>에서 다루었던 내용을 중심으로 국립전파연구원 전자파인체보호위원회 연구분과위원회에서 논의된 사항을 추가하여 무선주파수 펄스파 노출 기준에 대해 기술하고자 한다.

현재 정부(과학기술정보통신부)의 전자파인체보호기준<sup>[2]</sup>은 펄스파 노출에 대해 별도의 기준을 규정하지 않고 있다. 즉, 기상 레이더나 항공관제 레이더에서 발생하는 펄스파 노출에 대한 적합성을 분석할 때 현 인체보호기준을 따른다면, 10 GHz 이하 주파수 대역에서는 6분 동안, 그 이상의 대역에서는  $68/f^{0.05}$ 분 동안 시간 평균된 전력밀도로 적합성을 평가하게 된다. 그러나 1998년 발행된 국제비전리복사방호위원회(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: ICNIRP) 지침<sup>[3]</sup>이나 미국전기전자학회(Institute of Electrical and Electronics Engineers: IEEE) C95.1-2005 표준<sup>[4]</sup>에 따르면 좁은 펄스폭을 갖지만, 높은 첨두(peak) 전력의 전자파 복사로부터 인체를 보호하기 위해 첨두 전력밀도를 비롯하여 펄스파에 대한 별도의 기준을 규정하고 있다. 따라서 레이더 등과 같이 평균 전력밀도는 낮을 수 있지만, 일시적으로 높은 첨두 전력밀도에 노출될 가능성이 있는 시설로부터 일반대중이나 직업인 보호를 위해 펄스파 노출에 대한 기준을 도입할 필요가 있다.

지침 또는 표준의 관련 제한 값을 검토하기 전에 두 기관의 생물학적 영향에 관한 관점의 차이를 살펴볼 필요가 있다. 본 논문에서는 IEEE 표준과 ICNIRP 지침 및 기타 최근 문서의 무선주파수 펄스파 노출 관련 주요 생물학적 또는 건강 영향 연구 결과를 요약한 뒤 노출 기준을 분석하도록 한다. 펄스파 노출에 대한 기준을 이해하기 위해서는 연속

파 노출의 이해가 선행되어야 하므로, 펄스파에만 국한하여 서술하기는 불가능하다. 경우에 따라 펄스파 노출의 경우에 연속파 노출에 대한 기준을 기본적으로 만족하고 또 다른 기준이 부가되는 수도 있다. 따라서 펄스파 노출을 어떻게 다루는가를 보이기 위해서는 기본적으로 연속파에 대한 기준을 참조할 수밖에 없다. 펄스 형태의 전자파 노출에 대한 실질적인 노출 평가는 주로 기준레벨에 대한 적합성 여부로 이루어지므로 본 논문에서는 주로 인체 내부 흡수 물리량보다는 외부 전자기장 기준에 관해 IEEE 표준과 ICNIRP 지침을 분석하도록 한다.

II. 펄스파의 생물학적 영향

기본적으로 펄스파라 하더라도 조직에서의 평균 에너지 축적률이 같을 경우, 연속파와 마찬가지로 체온 상승을 초래할 수 있다. 전신에 걸친 원거리장의 무선주파수 노출 연구는 치사(致死) 수준 또는 이와 근접한 수준의 강한 장을 인가했을 경우에만 토끼 눈에 백내장이 일어남을 보여준다<sup>[5],[6]</sup>. 또한 근거리장의 강한 국부 노출은 개<sup>[7]-[9]</sup>와 토끼<sup>[10]-[12]</sup>의 눈에 백내장을 일으킬 수 있으며, 동일한 평균 전력에서 지속적인 펄스 형태의 무선주파수 노출도 토끼 백내장 발생에 같은 영향<sup>[13]</sup>을 주는 것으로 보고하고 있다<sup>[4]</sup>.

그러나 현재까지 동물 행동, 눈의 병리학적 영향, 칼슘 유출 영향, 암 관련성 등 많은 분야의 연구에서 무선주파수의 연속파 노출에 대해서도 관련 영향의 증거를 명확히 제시하지 못한 상황이어서 펄스파로 인한 구분되는 영향은 보고되지 않았다. 따라서 이러한 영향 연구에 대해서는 본 논문에서 언급하지 않기로 한다.

다만, 조직에서의 평균 에너지 축적률이 같을 경우, 특히 "마이크로파 청각" 효과와 같이 임계치가 명확한 영향에 있

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (2017-0-00961, 스마트 사회 전자파 노출량 제어 기반 구축)

어서 펄스 변조 마이크로파 전자기장은 연속파에 비하여 일반적으로 생물학적 응답을 발생시키는데 더 효과적이라고 알려져 있다<sup>[3]</sup>. 매우 조용한 환경에서 높은 침투 전력을 가진 마이크로파 펄스로부터의 짧은 비정상 발열은 췌장 소리, 평 하는 소리, 또는 딸각하는 소리로 레이더 펄스를 들을 수 있다는 것이 확인되었다<sup>[14]~[17]</sup>.

마이크로파 펄스의 청취는 인간의 청각 지각에서 일반적으로 발생하는 공기 또는 뼈에 의해 전도된 소리 에너지에 대한 예외적 현상으로, 실험적 및 이론적 연구는 마이크로파 청각 현상이 중추 신경계의 청각 신경 생리학 경로를 따라 청각 신경 또는 뉴런과 마이크로파 펄스가 직접 상호 작용함으로써 발생하지 않는다는 것을 보여주었다. 대신, 펄스파 에너지가 머리 내 연조직에 흡수되어 발생하는 음향 압력 열탄성효과가 내이의 미로 내에 있는 액체와 관련된 조직의 확장을 야기하여 청각 수용기들을 자극하는 음파를 발생시킴으로써 청각 효과가 나타난다는 사실이 많은 실험적 증거와 모델 연구결과에 의해 뒷받침된다<sup>[18]~[23]</sup>. 문헌에 보고된 청각 효과를 일으키는 무선 주파수는 2.4 MHz~10 GHz 대역의 범위를 가진다<sup>[4],[24]~[27]</sup>. 10 GHz 이상 대역의 무선주파수 에너지에 관한 인체의 인지는 보고되지 않았으며, 따라서 30 GHz 이상의 mmW 대역에서 계산된 무선주파수 청취 임계치는 알려져 있지 않다<sup>[4],[28]</sup>.

한편, 강한 펄스 형태의 마이크로파 전자기장에 대한 노출은 의식이 있는 쥐의 놀람 반응(startle response)을 억제하고 몸의 움직임을 유발한다고 보고되었다<sup>[29]~[31]</sup>. 몸의 움직임을 유발하는 효과의 임계치는 중뇌에서의 에너지 흡수 레벨 200 J/kg(펄스폭 10  $\mu$ s) 이었다. 펄스 변조 마이크로파의 이러한 효과에 대한 메카니즘은 아직 명확히 알려져 있지 않지만, 마이크로파 청취 현상과 관련이 있다고 여겨진다<sup>[3]</sup>.

마이크로파 청각 현상은 단일 펄스의 에너지에 따라 달라지며, 평균 전력밀도와는 무관하다. Guy 등<sup>[22]</sup>은 2.45 GHz 주파수 펄스 신호에 대한 무선주파수 청취 임계치는 펄스 당 0.4 J/m<sup>2</sup>(40  $\mu$ J/cm<sup>2</sup>)의 에너지 밀도 또는 펄스 당 에너지 흡수 16 mJ/g과 관련됨을 발견하였다<sup>[4],[22]</sup>. <표 1>은 참고문헌 [22]에서 발췌한 인체의 무선주파수의 청취 임계치를 나타낸다. 두 명의 자원자를 대상으로 2.45 GHz 대역 혼안테나(32×26 cm<sup>2</sup> 개구)를 사용하여 실험하였으며, 자원자가 없을 때 머리 표면 위치에서 평균 전력밀도를 측정장비

<표 1> 인체의 마이크로웨이브의 청취 반응 임계 에너지<sup>a)</sup>[22]

침투 입사 전력밀도 (W/cm <sup>2</sup> )	평균 입사전력 밀도 (mW/cm <sup>2</sup> )	펄스폭 ( $\mu$ s)	펄스 당 입사 에너지밀도 ( $\mu$ J/cm <sup>2</sup> )	펄스 당 침투 흡수 에너지밀도 <sup>b)</sup> (mJ/kg)
40	120	1	40	16
20	120	2	40	16
13.3	120	3	40	16
10	120	4	40	16
8	120	5	40	16
4	120	10	40	16
2.33	105	15	35 <sup>c)</sup>	14
2.15	129	20	43	17
1.8	135	25	45 <sup>d)</sup>	18
1.25	120	32	40	16

a) 자원자 두 명 중 첫 번째 자원자의 결과

b) 인체 머리의 등가 구형(spherical) 모델

c) 귀마개 사용 시 28

d) 두번째 자원자는 135

(Narda 8100 power monitor)로 측정하였다. <표 1>에서 대략 400 mJ/m<sup>2</sup>의 에너지 밀도가 임계치로 나타나며, 이는 10  $\mu$ s 동안 1.6 kW/kg의 전자파흡수율(SAR) 임계치를 산출함을 보인다. 이 SAR 값은 과거 1999년 IEEE C95.1 표준(현재 FCC 기준과 동일함)<sup>[32]</sup>의 일반인 SAR 임계치의 1,000배와 같다.

ICNIR 지침은 여러 문헌을 참고하여 펄스폭 30  $\mu$ s 미만의 펄스로 변조된 2.45 GHz의 경우, 사람의 청각 감지 임계치를 약 100~400 mJ/m<sup>2</sup>(4~16 mJ/kg의 전자파 흡수 (SA))로 보았다. 설치류의 청각 임계치는 사람보다 약 1/10 수준으로 낮아서, 펄스폭 30 ms 미만의 펄스파에서 1~2 mJ/kg 이다. 이 정도 수준의 펄스파는 또한 쥐의 다양한 뇌 영역에 있어서 스트레스 및 불안 반응에 관여하고 있는 신경 수용기의 농도 및 신경전달 물질의 대사에도 영향을 미친다고 보고되어 있다<sup>[3]</sup>.

가청음을 발생시키는 급속한 열탄성 팽창은 펄스파로부터 에너지 흡수로 인한 조직의 온도 상승이 단지 5×10<sup>-6</sup>°C 일 때 발생한다<sup>[33]~[36]</sup>. 마이크로파 청취 현상에 관한 문헌에서 약 50  $\mu$ s보다 더 긴 펄스의 효율은 침투 SAR 레벨에 따라 달라지며, 최초 30  $\mu$ s 내지 70  $\mu$ s 이내에서 전달되는

펄스 에너지가 음압파(acoustic pressure waves)를 생성하기에 가장 효율적임을 보여주었다<sup>[4],[37]</sup>.

마이크로파 청각 효과는 조직 가열 외에 알려진 상호 작용 메커니즘(마이크로파에 의해 유도되는 머리 내 음압파의 열탄성 이론)으로 마이크로파 전자파에 대해 가장 널리 수용되는 생물학적 효과이다. 그러나 오랜 기간 노출이나 임계치를 초과하는 마이크로파 펄스의 노출에 대한 영향을 체계적으로 조사할 필요가 있다. 이러한 마이크로파 청각 효과는 확인된 생물학적 영향이지만, 인지 자체가 건강에 악영향을 미치지 않으므로, IEEE 표준에서는 방지해야 할 효과로 인식하지 않았다. 그러나 ICNIRP 1998 지침<sup>[3]</sup>에서는 마이크로파 청각효과에 반복 또는 장시간 노출되는 것은 스트레스가 되어 유해할 가능성도 있다고 보았다.

### III. ICNIRP 지침과 IEEE 표준 노출 제한

#### 3-1 무선주파수 펄스파 노출 기준

펄스파 노출이라 하더라도 연속파 노출에 대한 기준의 적합성이 기본적으로 고려되어야 할 것이다. 먼저, IEEE 표준은 3~300 GHz 주파수의 전자파 노출에 대해 가열과 관련된 역효과를 방지하기 위해 기본한계를 입사 평면파의 전력밀도로서 설정하였다<sup>[4]</sup>. IEEE 표준에서 3~300 GHz 주파

수 범위의 기본한계는 <표 2>에 나타난 해당 최대허용노출(maximum permissible exposure: MPE)의 전력밀도와 동일하다. 서로 다른 주파수의 전자기장 발생원이 있는 경우, 노출에 대한 적합성은 각 주파수의 발생원에 대해 적용 가능한 MPE( $E^2$ ,  $H^2$ , 또는 전력밀도(S))의 백분율을 더하였을 때 100 %를 초과하지 않는지를 확인하여 결정한다. 3~6 GHz 주파수 범위에서는 입사 전력밀도 또는 국부 SAR을 평가하여 적합성을 입증할 수 있다. IEEE C95.1 표준의 무선주파수 펄스파 노출에 대한 기준은 아래와 같다.

- 1) 100 kHz~300 GHz 주파수 범위의 펄스 형태의 무선주파수 전자기장 노출의 경우, 순간 침투 전기장의 MPE (일시적) 값은 100 kV/m이다.
- 2) 100 kHz~300 GHz 주파수 범위에서 침투 펄스 전력 밀도는 시간 평균과 침투 전기장 제한 값에 의해서만 제한되나, 예외로서, 평균 시간 내에 임의의 0.1초 동안 총 입사 에너지 밀도는 연속파 전자기장에 대한 전체 평균 시간 동안 허용되는 총 에너지 밀도의 1/5을 초과하지 않아야 한다(144 J/kg의 1/5). 즉,

$$\sum_0^{0.1s} S_{pk} \times \tau \leq \frac{MPE \times T_{avg}}{5} \leq 28.8 \text{ J/kg} \quad (1)$$

<표 2> IEEE C95.1-2005의 최대허용노출 (MPE)

(a) 관리 환경 (직업인)

주파수 범위 (MHz)	rms 전기장 (E) <sup>a</sup> (V/m)	rms 자기장 (H) <sup>a</sup> (A/m)	rms 전력밀도 (S) (W/m <sup>2</sup> )	평균 시간 (min)
0.1~1.0	1,842	16.3 / $f_M$	(9,000, 100,000 / $f_M^2$ ) <sup>b</sup>	6
1.0~30	1,842 / $f_M$	16.3 / $f_M$	(9,000 / $f_M^2$ , 100,000 / $f_M^2$ )	6
30~100	61.4	16.3 / $f_M$	(10, 100,000 / $f_M^2$ )	6
100~300	61.4	0.163	10	6
300~3,000	-	-	$f_M / 30$	6
3,000~30,000	-	-	100	19.63 / $f_G^{1.079}$
30,000~300,000	-	-	100	2.524 / $f_G^{0.476}$

비고 -  $f_M$ 는 MHz로 나타난 주파수이며,  $f_G$ 는 GHz로 나타난 주파수이다.

<sup>a</sup> 원역장 평면파 노출과 같이 신체 크기에 대해 균일한 노출의 경우, 노출 전자기장 세기와 전력밀도를 표에 주어진 MPE와 비교한다. 비균일 노출의 경우에는 장 세기의 제곱을 공간에 대해 평균하거나 전력밀도를 신체의 수직 단면과 동일한 면적(투영면적)에 대해 평균하여 얻은 노출 전자기장의 평균값을 표에 주어진 MPE와 비교한다.

<sup>b</sup> 평면파 등가 전력밀도 값은 고주파수에서 MPE와 비교할 때 편리하게 이용된다.

<표 2> Continued

(b) 비관리 환경(일반인)

주파수 범위 (MHz)	rms 전기장 (E) <sup>a</sup> (V/m)	rms 자기장 (H) <sup>a</sup> (A/m)	rms 전력밀도 (S) (W/m <sup>2</sup> )	평균 시간 (min)	
0.1~1.34	614	16.3 / f <sub>M</sub>	(1,000, 100,000 / f <sub>M</sub> <sup>2</sup> ) <sup>c</sup>	6	6
1.34~3	823.8 / f <sub>M</sub>	16.3 / f <sub>M</sub>	(1,800 / f <sub>M</sub> <sup>2</sup> , 100,000 / f <sub>M</sub> <sup>2</sup> )	f <sub>M</sub> <sup>2</sup> / 0.3	6
3~30	823.8 / f <sub>M</sub>	16.3 / f <sub>M</sub>	(1,800 / f <sub>M</sub> <sup>2</sup> , 100,000 / f <sub>M</sub> <sup>2</sup> )	30	6
30~100	27.5	158.3 / f <sub>M</sub> <sup>1.668</sup>	(2, 9,400,000 / f <sub>M</sub> <sup>3.336</sup> )	30	0.0636 f <sub>M</sub> <sup>1.337</sup>
100~400	27.5	0.0729	2	30	30
400~2,000	-	-	f <sub>M</sub> / 200	30	
2,000~5,000	-	-	10	30	
5,000~30,000	-	-	10	150 / f <sub>G</sub>	
30,000~100,000	-	-	10	25.24 / f <sub>G</sub> <sup>0.476</sup>	
100,000~300,000	-	-	(90f <sub>G</sub> - 7,000) / 200	5,048 / [(9f <sub>G</sub> - 700) f <sub>G</sub> <sup>0.476</sup> ]	

비고 - f<sub>M</sub>는 MHz로 나타난 주파수이며, f<sub>G</sub>는 GHz로 나타난 주파수이다.

<sup>a</sup> 원역장 평면파 노출과 같이 신체 크기에 대해 균일한 노출의 경우, 노출 장 세기와 전력밀도를 표에 주어진 MPE와 비교한다. 비균일 노출의 경우에는 장 세기의 제곱을 공간에 대해 평균하거나 전력밀도를 신체의 수직 단면과 동일한 면적(투영면적)에 대해 평균하여 얻은 노출 전자기장의 평균값을 표에 주어진 MPE와 비교한다.

<sup>b</sup> 왼쪽 열은 |E|<sup>2</sup>에 대한 평균 시간을 나타내며, 오른쪽 열은 |H|<sup>2</sup>에 대한 평균 시간을 나타낸다. 400 MHz 이상의 주파수에서, 평균 시간은 전력밀도 S에 대해 적용된다.

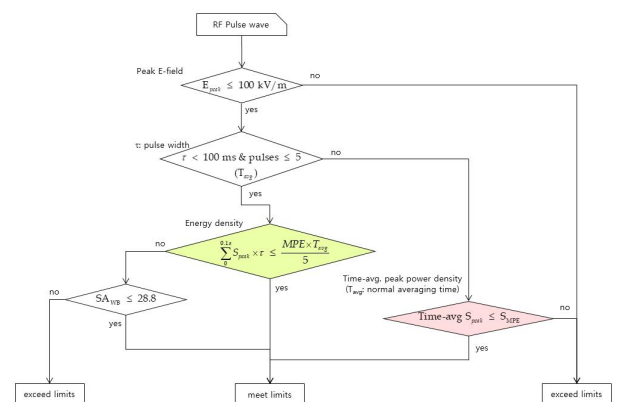
<sup>c</sup> 평면파 등가 전력밀도 값은 고 주파수에서 MPE와 비교할 때 편리하게 이용된다.

여기서, τ는 펄스 폭, MPE와 T<sub>avg</sub>는 각각 평면파 등가 전력밀도 최대허용노출 제한 값과 평균 시간을 나타낸다. 즉, IEEE 표준의 경우에는 직업인 노출이나 일반인 노출에 대해 모두 동일한 에너지 제한 값을 적용한다. 144 J/kg은 직업인 전신 노출 SAR 기준인 0.4 W/kg에 6분간 노출될 때의 전자파 흡수(specific absorption: SA)에 해당한다. 식 (1)에서 평균 시간과 동일한 임의의 시간 동안에 펄스 폭 100 ms 이하의 펄스는 최대 5개까지 허용된다. 평균 시간 동안 펄스가 5개 이상 존재하거나 펄스 폭이 100 ms 이상인 경우에는 공칭(normal) 평균 시간 계산을 적용한다.

상기의 IEEE 표준의 무선주파수 펄스와 노출에 대한 기준 적용 방법을 아래 흐름도 [그림 1]에 요약하여 표현하였다. 어떤 펄스와 노출에 대해 적합성을 평가할 때 <표 2>의 일반적인 시변 전자기장 노출 기준과도 부합하여야 한다면 [그림 1]의 절차에서 공칭(normal) 평균 시간에 대한 평균 노출의 적합성 평가 또한 포함되어야 할 것이다. 전신 SA 28.8 J/kg은 펄스와 노출에 대한 IEEE의 기본한계로 볼 수 있다. 따라서 100 ms 내 총 에너지 밀도가 MPE×T<sub>avg</sub>/5를 만족하지

않더라도 28.8 J/kg의 전신 SA 기준을 만족하면 기준에 부합한다고 할 수 있다. 그러나 전신 SA는 평가하기가 어려운 물리량이므로, 현실적으로는 전기장 강도, 에너지 밀도 또는 전력밀도와 같이 외부 전자기장을 측정 또는 계산하여 적합성을 평가하게 될 것이다.

ICNIRP 지침은 주파수가 10 MHz를 초과하는 경우, 펄스



[그림 1] IEEE C95.1-2005<sup>[4]</sup>의 펄스와 노출 평가 흐름도

폭에 대해 시간 평균한  $S_{eq}$ (등가 전력밀도)가 기준레벨의 1,000배를 초과하지 않을 것, 즉, 전기장과 자기장 강도가 기준레벨의 32배를 초과하지 않을 것을 권고한다. <표 3> (a)와 (b)는 ICNIR 지침의 직업인과 일반인 노출에 대한 기

준레벨을 각각 나타낸다<sup>[3]</sup>.

ICNIR 지침에 따르면 정상적인 청력을 가진 사람은 약 200 MHz에서 6.5 GHz 대역의 펄스 변조 전자기장을 감지할 수가 있다. 열탄성 팽창에 의한 청각효과를 제한 또는 회피

<표 3> ICNIR 지침의 시변 전기장 및 자기장의 기준레벨(rms 값)

(a) 직업인 노출<sup>a</sup>

주파수 범위	전기장 (V/m)	자기장 (A/m)	자속밀도 ( $\mu$ T)	등가 평면파 전력밀도 $S_{eq}$ (W/m <sup>2</sup> )
1 Hz 까지	—	$1.63 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	—
1~8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$	—
8~25 Hz	20,000	$2 \times 10^4 / f$	$2 \times 10^4 / f$	—
0.025~0.82 Hz	500/f	20/f	25/f	—
0.82~65 kHz	610	24.4	30.7	—
0.065~1 MHz	610	1.6/f	2.0/f	—
1~10 MHz	610/f	1.6/f	2.0/f	—
10~400 MHz	61	0.16	0.2	10
400~2000 MHz	$3 f^{1/2}$	$0.008 f^{1/2}$	$0.01 f^{1/2}$	$f/40$
2~300 GHz	137	0.36	0.45	50

(b) 일반인 노출<sup>a</sup>

주파수 범위	전기장 (V/m)	자기장 (A/m)	자속밀도 ( $\mu$ T)	등가 평면파 전력밀도 $S_{eq}$ (W/m <sup>2</sup> )
1 Hz 까지	—	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$	—
1~8 Hz	10,000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	—
8~25 Hz	10,000	$4,000 / f$	$5,000 / f$	—
0.025~0.8 Hz	250/f	4/f	5/f	—
0.8~3 kHz	250/f	5	6.25	—
3~150 kHz	87	5	6.25	—
0.15~1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	—
1~10 MHz	$87 / f^{1/2}$	0.73/f	0.92/f	—
10~400 MHz	28	0.073	0.092	2
400~2,000 MHz	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	$f/200$
2~300 GHz	61	0.16	0.20	10

<sup>a</sup> 주)

1. 주파수 f의 단위는 '주파수 범위' 란에 표시된 단위와 같음.
2. 기본한계를 만족하고 간접적 결합에 의한 유해한 영향을 배제할 수 있다면, 전자기장 강도가 표시 값을 초과하여도 좋다.
3. 100 kHz~10 GHz 대역 사이에서,  $S_{eq}$ ,  $E^2$ ,  $H^2$ ,  $B^2$ 은 임의 6분간의 평균을 취한다.
4. 100 kHz~10 MHz 대역의 침투 값은 100 kHz에서 1.5 배, 10 MHz에서 32배가 되도록 내삽한다. 10 MHz 이상 주파수에서는 펄스 폭에 대해 시간 평균한 침투 등가평면파 전력밀도가 표에서  $S_{eq}$  값의 1,000배를 초과하지 않도록, 또는 전기장, 자기장강도가 표에 주어진 레벨의 32배를 초과하지 않을 것을 권고한다.
5. 10 GHz 이상의 대역에서  $S_{eq}$ ,  $E^2$ ,  $H^2$ ,  $B^2$ 은 임의 68/f<sup>0.5</sup> 분간의 평균을 취한다(f의 단위는 GHz).

하기 위해서는 펄스파에 의한 SA를 제한하여야 한다고 판단하였다. 이에 주파수 0.3~10 GHz 대역에서 머리에 국부 노출을 초래하는 펄스파의 경우에는 10 g의 조직에서 평균한 SA가 직업적 노출에서 10 mJ/kg을 초과하지 않을 것, 일반대중의 경우는 2 mJ/kg을 초과하지 않아야 한다고 추가적 기본한계를 설정하였다.

펄스파 노출에 대해 ICNIRP 지침에 따른 적합성 평가 흐름도를 [그림 2]에 나타내었다. [그림 2]는 펄스파 노출에 대해 시변 전자기장 노출 기준(ICNIRP 지침의 기준레벨 <표 3> 및 10 GHz 이하의 SAR 기본한계)을 만족하여도 침투 전력밀도 기준(기준 레벨)과 국부 SA 기준(기본 한계)과의 적합성이 요구됨을 의미한다.

[그림 3]은 IEEE C95.1 표준 <표 2>와 ICNIRP 지침 <표 3>으로부터 계산된 SA를 그래프로 보여준다. 세로축의 S와 T<sub>avg</sub>는 IEEE 표준에 대해서는 MPE 전력밀도 S 및 평균 시간을, ICNIRP 지침에 대해서는 등가 평면파 전력밀도 S<sub>eq</sub>(또는

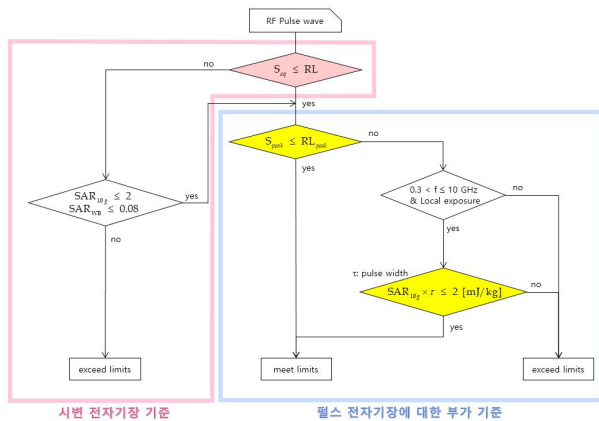
전기장과 자기장 기준레벨의 곱) 및 해당 평균 시간을 각각 나타낸다. [그림 3]에서 보는 바와 같이 IEEE 표준은 수 GHz 이상부터 전자파 흡수에 있어 점차 직업인과 일반인의 구분이 없게 되어 300 GHz에서 레이저 기준<sup>[38],[39]</sup>과 일치하게 된다. 이에 반해 ICNIRP 지침은 직업인과 일반인 평가 시 적용하는 평균 시간은 동일하지만 기준레벨에 차이가 있기 때문에 모든 주파수 대역에서 에너지 밀도에 관해 일반인 기준이 더 엄격하다.

IEEE 표준에서 식 (1)이 적용되는 경우와 같이 펄스 폭이 좁고 (< 100 ms), 펄스 개수가 많지 않을 때 주파수 구간에 따라 다르지만, 100 ms 동안의 에너지 밀도는 <표 2>에서 산출되는 SA의 1/5에 해당하는 낮은 값을 적용한다. 그러나 펄스의 침투 제한 값이 100 kV/m으로 ICNIRP의 기준레벨 전기장의 32배에 비해 매우 높은 값이므로 펄스폭이 수 μs와 같이 매우 좁은 경우, IEEE 표준은 ICNIRP 지침과 비교해 훨씬 높은 침투 전기장 노출을 허용하게 된다.

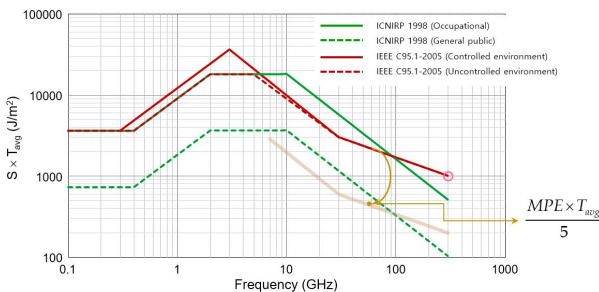
### 3-2 입사 전자파의 평균하는 면적

전자파의 노출량 평가 시 평균하는 면적(averaging area)이 중요하므로 이에 대해 서술하도록 한다. IEEE C95.1은 3~30 GHz 대역에서 100 λ<sup>2</sup>에 해당하는 임의의 연속된 면적에 대해 전력밀도를 공간적으로 평균한다. 여기서 λ는 RF 장의 자유 공간 파장(cm 단위)이다. 30 GHz를 초과하는 주파수에서는 0.01 m<sup>2</sup>(100 cm<sup>2</sup>)의 임의의 인접 면적에 대해 전력밀도를 공간적으로 평균하되, 임의의 1 cm<sup>2</sup>에서 1,000 W/m<sup>2</sup>의 최대 전력밀도를 초과하지 않도록 한다. 30 GHz 이상의 대역에서 공간 침투 평균 면적 1 cm<sup>2</sup>를 선택한 것은 레이저 복사에 대해 인체 보호를 위한 ICNIRP 지침<sup>[38]</sup>, ANSI 표준<sup>[39]</sup>과 일치하도록 하는 것과 약 1 cm<sup>2</sup>에 해당하는 각막의 표면적에 근거한다<sup>[4]</sup>.

한편, ICNIRP 지침은 앞서 언급하였듯이 100 kHz~10 GHz의 주파수 범위에서는 SAR을 노출량 제한을 위한 기본한계 물리량으로 사용하지만, 10~300 GHz의 주파수 범위에서는 IEEE 표준과 마찬가지로 기본한계 및 기준레벨을 전력밀도로써 설정한다. 전력밀도는 노출 영역에서 임의의 20 cm<sup>2</sup>에 대한 평균치로 하되, 1 cm<sup>2</sup>마다 평균한 공간의 최대 전력밀도는 기준 값의 20배를 넘어서는 안된다<sup>[3]</sup>. IEEE 표준 및



[그림 2] ICNIRP 지침<sup>[3]</sup>의 펄스파 노출 평가 흐름도



[그림 3] IEEE C95.1 표준과 ICNIRP 지침의 비교

ICNIRP 지침은 각각 30 GHz와 10 GHz 이상의 주파수 대역에서 전력밀도 기준에 대한 적합성을 평가·평균하는 공간면적에 대해 부가적으로 1 cm<sup>2</sup>에 대한 기준을 제시한 것은 전자파의 분포가 매우 불균일할 경우를 대비한 것이라 볼 수 있다.

일반적으로 노출되는 전자파의 공간적 분포가 불균일할 경우, 평균하는 면적이 작으면 더 엄격한 것으로 볼 수 있다. 따라서 10 GHz 이상의 주파수에서 IEEE 표준의 평균 면적 100 λ<sup>2</sup>(3~30 GHz) 및 0.01 m<sup>2</sup>(30 GHz 초과)과 ICNIRP 지침의 20 cm<sup>2</sup>를 비교하면, ICNIRP 지침이 더 엄격하다. 또한, 임의의 1 cm<sup>2</sup>에 대한 최대 전력밀도의 경우, ICNIRP 지침은 직업인과 일반인 기준이 각각 1,000 및 200 W/m<sup>2</sup>이고, IEEE는 직업인과 일반인의 구분 없이 1,000 W/m<sup>2</sup>이다. 그러므로 1 cm<sup>2</sup>에 대한 일반인 최대 전력밀도 기준값에 있어서도 ICNIRP 지침이 IEEE 표준보다 더 엄격하다고 할 수 있다.

#### IV. 결 론

연속파 노출에 대해서조차도 ICNIRP 지침과 IEEE 표준 간에 기본한계(SAR 기준은 동일) 및 기준레벨(또는 MPE)이 서로 다르기 때문에 펄스파 노출에 대한 두 기관 간의 직접적인 기준 비교는 다소 복잡하므로 <표 4>와 같이 요약하였다. 두 기관이 공통적으로 규정하고 있는 펄스파의 침투값 기준에 있어 IEEE는 전기장을 100 kV/m로 규정한다. 이를 등가 평면파 전력밀도로 환산하면 약 27×10<sup>6</sup> W/m<sup>2</sup>로 ICNIRP 지침의 침투 전력밀도 기준 10,000 및 50,000 W/m<sup>2</sup>보다 훨씬 높다. ICNIRP 지침에서는 펄스파에 대한 별도의

에너지 밀도 기준은 규정하지 않고 있다. IEEE 표준의 펄스파 에너지 밀도 기준은 100 ms 동안 평가하도록 되어 있으며, 또한 이 기준은 펄스폭이 좁고(< 100 ms) 펄스 주기가 긴 경우(T<sub>avg</sub> 동안 5개 펄스 이하)일 때에만 적용된다. 그러나 이 기준의 근거가 모호하여 추가적인 분석이 요구된다.

펄스파 노출에 대해 생물학적 관점에서 두 기관이 바라보는 뚜렷한 차이점은 마이크로파 청각 효과에 있다. 마이크로파 청각 효과는 과학적으로 확인된 조직 가열과 다른 상호 작용 메커니즘이다. 그러나 ICNIRP 지침에서 국부 SA 기준의 근거로 삼고 있는 무선주파수 청취 임계치인 펄스당 에너지 흡수량 16 mJ/g에 관한 대부분의 문헌들이 오래 전(1970년대~)에 발행된 것들이므로, 정교한 수치해석을 통한 검증이 요구된다. 또한 다양한 주파수의 펄스 변조 및 펄스폭에 대한 체계적 영향을 조사하여 근거를 명확히 할 필요가 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 이애경, "펄스파 노출에 대한 인체보호기준 분석", 전자파 인체보호 활동 및 표준화 동향 보고서 통권 제14호, pp. 41-47, 2017년. 12월.
- [2] 전자파인체보호기준, 미래창조과학부고시 제2013-118호.
- [3] ICNIRP (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection), 1998, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Phys.*, vol. 74, pp. 494-522.
- [4] IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human

<표 4> ICNIRP 지침과 IEEE 표준의 무선주파수 펄스파 노출에 관련되는 기준 요약

	ICNIRP	IEEE
펄스파 노출 제한값	펄스폭의 시간평균: 일반인 10×10 <sup>3</sup> W/m <sup>2</sup> , 직업인 50×10 <sup>3</sup> W/m <sup>2</sup> (전력밀도 기준레벨의 1,000배)	펄스의 순간 침투 전기장: 100×10 <sup>3</sup> V/m (27×10 <sup>6</sup> W/m <sup>2</sup> )
(평균하는 면적)	20 cm <sup>2</sup>	100 λ <sup>2</sup> (3~30 GHz), 100 cm <sup>2</sup> (>30 GHz)
공간침투 제한 값	일반인 200 W/m <sup>2</sup> , 직업인 1,000 W/m <sup>2</sup> (10 GHz 이상, 전력밀도 기준레벨의 20배)	1,000 W/m <sup>2</sup> (30 GHz 이상)
(평균하는 면적)	1 cm <sup>2</sup>	

- Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, *IEEE Standard C95.1*, 2005.
- [5] R. J. Williams, A. McKee, and E. D. Finch, "Ultrastructural changes in the rabbit lens induced by microwave radiation", In Tyler P.W. (ed), *Biological Effects of Nonionizing Radiation*, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, vol. 247, pp. 166-174, 1975.
- [6] S. E. Hirsch, B. S. Appleton, B. S. Fine, and P. V. Brown, "Effects of repeated microwave irradiations to the albino rabbit eye", *Investigative Ophthalmology and Visual Sci.*, vol. 16, pp. 315-319, 1977.
- [7] H. D. Baillie, "Thermal and nonthermal cataractogenesis by microwaves", In: Cleary S. F., *Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation*, U.S. Dept. of Health, Education, and Welfare, Washington, DC, HEW Publication BRH/DBE 7-2, pp. 59-65, 1970.
- [8] H. D. Baillie, H. G. Heaton, and D. K. Pal, "The dissipation of microwaves as heat in the eye", In: Cleary S. F., *Biological Effects and Health Implications of Microwave Radiation*, U.S. Dept. of Health, Education, and Welfare, Washington, DC, HEW Publication BRH/DBE 70-2, pp. 85-89, 1970.
- [9] L. Daily, K. J. Wakim, J. F. Herrick, E. M. Parkhill, and W. L. Benedict, "The effects of microwave diathermy on the eye", *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 33, pp. 1241-1254, 1950.
- [10] D. G. Cogan, S. J. Fricker, M. Lubin, D. D. Donaldson, and H. Hardy, "Cataracts and ultra-high-frequency radiation", *A.M.A. Arch. Ind. Health*, vol. 18, pp. 299-302, 1958.
- [11] R. L. Carpenter, C. A. Van Ummersen, "The action of microwave radiation on the eye", *J. Microwave Power*, vol. 3, pp. 3-19, 1968.
- [12] G. L. Hagan, R. L. Carpenter, "Relative caractogenic potencies of two microwave frequencies (2.45 and 10 GHz)", In: C. C. Johnson and M. L. Shore (eds.), *Biological Effects of Electromagnetic Waves*, vol 1, U.S. Dept. of Health, Education, and Welfare, HEW Publication (FDA) 77-8010, pp 143-155, 1976.
- [13] L. Birenbaum, G. M. Grosos, S. W. Rosenthal, and M. M. Zaret, "Effect of microwaves on the eye", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 16, pp. 7-14, 1969.
- [14] A. H. Frey, "Auditory system response to radio-frequency energy", *Aerospace Med.*, vol. 32, pp. 1140-1142, 1961.
- [15] A. H. Frey, "Psychophysical analysis of microwave sound perception", *J. Bioelectricity*, vol. 4, pp. 1-14, 1985.
- [16] A. H. Frey, R. Messenger, "Human perception of illumination with pulsed ultrahigh-frequency electromagnetic energy", *Science*, vol. 181, pp. 356-358, 1973.
- [17] Airborne Instrument Labs, "An observation on the detection by the ear of microwave signals", *Proc. IRE*, vol. 44, pp. 2-5, 1956.
- [18] SCENIHR (Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) (2015). Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF).
- [19] J. C. Lin, J. L. Su, and Y. Wang, "Microwave-induced thermoelastic pressure wave propagation in the cat brain", *Bioelectromagnetics*, vol. 9, pp. 141-147, 1988.
- [20] C-K. Chou, K. C. Yee, and A. W. Guy, "Auditory response in rats exposed to 2,450 MHz electromagnetic fields in a circularly polarized waveguide", *Bioelectromagnetics*, vol. 6, pp. 323-326, 1985.
- [21] K. R. Foster, E. D. Finch, "Microwave hearing: evidence for thermoacoustic auditory stimulation by pulsed microwaves", *Science*, vol. 185, pp. 256-258, 1974.
- [22] A. W. Guy, C-K. Chou, J. C. Lin, and D. Christensen, "Microwave-induced acoustic effects in mammalian auditory systems and physical materials", In Tyler P.W. (ed), *Biological Effects of Nonionizing Radiation*, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, Vol. 247, pp. 194-218, 1975.
- [23] R. G. Olsen, J. C. Lin, "Microwave pulse-induced acoustic resonances in spherical head models", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 29, pp. 1114-1117, 1981.
- [24] C. A. Cain, W. J. Rissmann, "Mammalian auditory responses to 3.0 GHz microwave pulses", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 25, pp. 288-293, 1978.



- [25] A. H. Frey, "Human auditory system response to modulated electromagnetic energy", *J. Appl. Physiol.*, vol. 17, pp. 689-692, 1962.
- [26] C. E. Ingalls, "Sensation of hearing in electromagnetic fields", *NY State J. Med.*, vol. 67, pp. 2992-2997, 1967.
- [27] P. Roschmann, "Human auditory system response to pulsed radiofrequency energy in RF coils for magnetic resonance at 2.4 to 170 MHz", *Magnetic Resonance in Medicine*, vol. 21, pp. 197-215, 1991.
- [28] O. P. Gandhi, A. Riazi, "Absorption of millimeter waves by human beings and its biological implications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 34, pp. 228-235, 1986.
- [29] National Radiological Protection Board. Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: III: Radiofrequency and microwave radiation. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; Report R-240, 1991.
- [30] Z. J. Sienkiewicz, N. A. Cridland, C. I. Kowalczyk, and R. D. Saunders, "Biological effects of electromagnetic fields and radiations". In: Stone, W. R.; Hyde, G., eds. *The Review of Radio Science: 1990-1992*. Oxford: Oxford University Press, 1993, pp. 737-770.
- [31] United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz). Geneva: World Health Organization, Environmental Health Criteria 137, 1993.
- [32] IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Standard C95.1, 1999.
- [33] K. R. Foster, E. D. Finch, "Microwave hearing: evidence for thermoacoustic auditory stimulation by pulsed microwaves", *Science*, vol. 185, pp. 256-258, 1974.
- [34] L. S. Gournay, "Conversion of electromagnetic to acoustic energy by surface heating", *J. Acous. Soc. Am.*, vol. 40, pp. 1322-1330, 1966.
- [35] H. C. Sommer, H. E. von Gierke, "Hearing sensations in electric fields", *Aerospace Med.*, vol. 35, pp. 834-839, 1964.
- [36] R. M. White, "Generation of elastic waves by transient surface heating", *J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 3559-3567, 1963.
- [37] ARPANSA, "Human auditory perception resulting from exposure to high power pulsed or modulated microwave radiation-specification of appropriate safety limits", Australian Radiation Protection & Nuclear Safety Agency, Lower Plenty Road, Yallambie VIC 3085, [http://www.arpansa.gov.au/aud\\_perc.htm](http://www.arpansa.gov.au/aud_perc.htm), 2003.
- [38] ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection), "Guidelines on limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1 mm", *Health Physics*, vol. 71, pp. 804-819, 1995.
- [39] ANSI Z136.1-2000, American National Standard for the Safe Use of Lasers.

≡ 필자소개 ≡

이 애 경



1990년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)  
 1992년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1992년 1월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원  
 2003년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)  
 2007년 7월~2008년 6월: 미국 NIST Radio-Frequency Fields Group 방문연구원

[주 관심분야] 전자파 인체 노출 평가

전 상 봉



2001년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
 2003년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2007년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2008년 6월~2010년 9월: 한국전자통신협회 EMC 기술지원센터  
 2010년 10월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원

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

최 형 도



1986년 2월: 고려대학교 재료공학과 (공학사)  
 1989년 8월: 고려대학교 재료공학과 (공학석사)  
 1996년 8월: 고려대학교 재료공학과 (공학박사)  
 2004년 6월~2005년 12월: 한국전파진흥협회 부설 EMC기술지원센터장  
 1997년 1월~현재: 한국전자통신연구원 방송통신미디어 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 인체 노출 평가, 전자파 저감 소재 및 부품, 전파 기술 등

권 용 기



1989년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학사)  
 1992년 2월: 고려대학교 물리학과 (이학석사)  
 2010년 2월 한국과학기술원 정보통신공학과 (공학박사)  
 1996년 2월~현재: 국립전파연구원 전파환경안전과

[주 관심분야] 전자파 인체안전, 전파전파, EMP

최 동 근



2003년 2월: 충북대학교 (공학사)  
 2005년 2월: 충북대학교 대학원 (공학석사)  
 2016년 2월: 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 (공학박사)

2006년 7월~현재: 국립전파연구원 공업연구사  
 [주 관심분야] 전자파 인체노출량 평가 기술, 전자파 수치해석, 전자파 인체보호

장 주 동



2011년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 2013년 2월: 충북대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
 2013년 2월~2015년 1월: 국립전파연구원 연구원  
 2015년 1월~현재: 국립전파연구원 공업연구사  
 [주 관심분야] 전자파 인체노출평가 및 SAR 측정 방법

백 정 기



1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1985년 9월: Virginia Tech 전자파전파 (공학석사)  
 1988년 9월: Virginia Tech 전자파전파 (공학박사)  
 1978년 3월~1983년 2월: 국방과학연구소  
 1988년 10월~1989년 2월: 한국전자통신연구원  
 1989년 3월~1995년 2월: 동아대학교 전자공학과 부교수

1995년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 교수  
 2002년 3월~현재: 충남대학교 전자파환경기술연구 (EM-ERC) 센터장  
 2009년 1월~2009년 12월: 한국전자파학회 학회장  
 [주 관심분야] 전자파 전파, 전자파 산란, 전자파 인체 영향

김 윤 명



1975년 2월: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)  
 1977년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 1990년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1977년 2월~1980년 2월: 金星精密工業株式會社 (現 벅스1 퓨처) 레이더 기술자 개발, 조립 및 시험 엔지니어  
 1980년 3월~2018년 2월: 단국대학교 공과대학 전자·전기공학부 교수  
 2000년 6월~현재 : (주)EMF Safety 대표이사  
 [주 관심분야] 전자파 인체 영향 및 환경 측정 연구

김 완 기



2005년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)  
 2007년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)  
 2007년 6월~현재: 한국방송통신전파진흥원 근무  
 [주 관심분야] 전자파 측정, 이동통신, 안테나

이 영 민



1999년 2월: 군산대학교 정보통신공학 (공학사)  
 2016년 2월: 연세대학교 통신방송전공 (공학석사)  
 2016년 3월: 전자파인체보호실무반 (WG9012) 위원 (TTA)  
 2016년 7월~현재: 정보통신표준 (TC106) 전문위원회 위원 (RRA)  
 2006년 7월~현재: 한국전파진흥협회 전자파기술

원 선임연구원  
 [주 관심분야] 전자파 인체 노출량 평가