

# 레이다 방사위험을 고려한 제한구역 설정방법

문현욱 · 이종현 · 선 응

LIG 벅스원(주)

## I. 서 론

최근 들어 방송통신융합 서비스의 다양화로 인해 인체에 대한 전자파 노출도가 날로 증가하고 있는 상황이다. 특히, 최근 스마트폰의 보급 확대, 웨어러블 기기의 출현 등 일상 생활에서 전자파 이용이 급격히 증가하고, 향후 사물인터넷의 확산 등이 예측됨에 따라 인체의 전자파 노출은 앞으로 더욱 심화될 것으로 전망된다. 한편, 세계보건기구(WHO)에서 2011년 5월 휴대전화 전자파를 2B 등급으로 분류하면서 전자파의 인체 유해성에 대한 우려가 증가하고 있으며, 국내의 경우 밀양 송전탑 관련 주민 대치, 아파트 중계기 철거 요구, 경남 성주 사드배치 등과 같이 전자파 인체 유해성과 관련한 갈등이 점차 커지고 있는 상황이다. 이렇게 인체의 전자파 노출도 및 인체 유해성에 대한 우려가 증가함에 따라 레이더와 같이 방사체를 포함한 시스템 개발 시 인체 유해성을 유발하는 전자파 방사 위험(Radiation Hazard)을 고려할 필요가 있다. 이러한 전자파에 의한 인체 영향은 [그림 1]과 같이 크게 자극작용(electrostimulation) 및 열적작용(heating)으로 나누어지는데, 자극작용은 주로 100 kHz 이하의 저주파에서 유도 및 접촉 전류에 의해 말초신경과 근육 자극을 일으키고, 열적작용은 주로 100 kHz 이상의 고주파에서 전자기장 에너지가 인체에 흡수되어 열을 발생시킴으로써 인체 조직을 손상시킨다<sup>[1]</sup>.

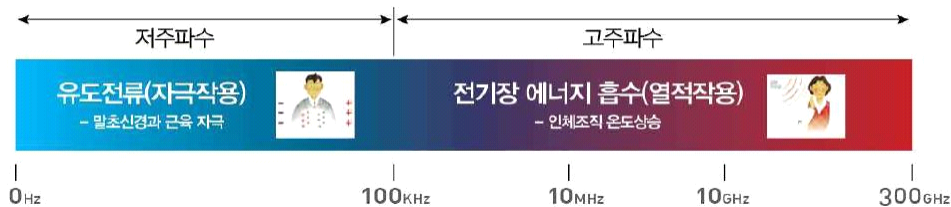
따라서 전자파로부터 인체를 보호하기 위해 WHO(World

Health Organization)는 국제기구의 표준을 적용하여 인체 영향을 규제하도록 권고하고 있으며, 이에 따라 각국은 미국전기전자학회(Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE) 또는 국제비전리방사보호위원회(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; ICNIRP) 표준에 대한 수용 여부를 자율적으로 결정하고 있다. 또한, 이 표준을 기반으로 상황에 따라 안전 인자(Safety factor)를 추가로 설정하여 전자파 방사에 대한 인체보호기준을 마련하고 있는 상황이다.

이렇게 전자파에 의한 인체 유해성을 막기 위한 노력이 지속되고 있기에 레이더 개발 시 전자파에 대한 인체보호기준을 명시하고, 개발 시스템이 이를 만족함을 증명할 필요가 있다. 그러므로 본 고에서는 국제 표준인 IEEE 표준 및 국내 인체보호기준에 대해 살펴보고, 레이더 제한구역 설정 방법에 대해 설명함으로써 레이더 개발 시 전자파 방사 위험을 막기 위한 안전거리 계산 방법에 대해 알아보하고자 한다.

## II. 전자파 인체영향 규제 표준

전자파에 의한 인체 유해성을 막기 위해선 인체에 안전한 전자파 방사 기준이 필요하다. 이러한 필요성에 따라 IEEE 및 ICNIRP 등 국제기구에서 전자파 인체보호기준에 대한 표준을 개발하여 공표하고 있으며, 이 표준을 기반으로 나라 및 기관별로 상황에 맞게 전자파 인체보호기준을 정하여 사용하고 있는 실정이다<sup>[1]</sup>. 그러나 인체보호기준에 대한 절대



[그림 1] 전자파 인체영향: 자극작용 및 열적작용

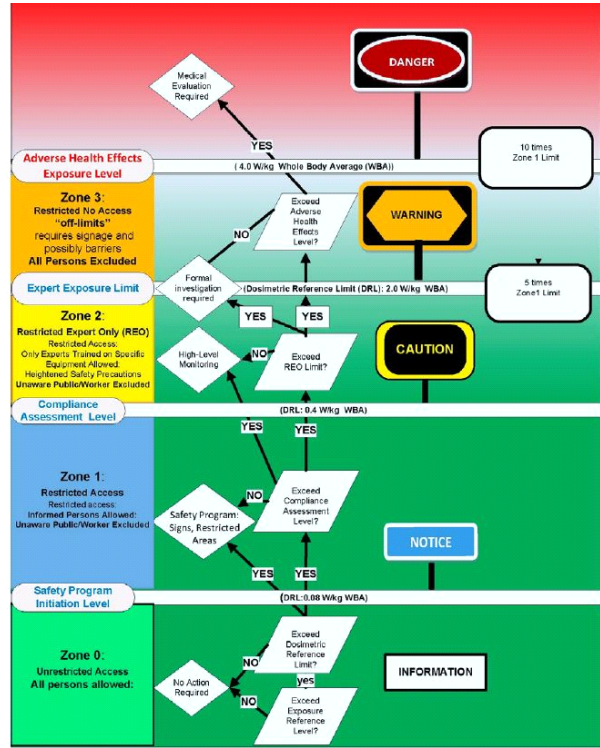
적인 표준은 없기에 본 고에서는 미국 전자파 인체보호기준의 기반이 되는 IEEE 표준 및 국내 전자파 인체보호기준에 대해 설명하고, 두 표준에 대해 비교하였다.

### 2-1 IEEE 표준

IEEE 표준에 대한 설명에 앞서 그 발전 방향에 대해 살펴보면, IEEE 표준위원회에서는 1986년까지 진행된 연구들을 기반으로 1991년 방사 노출과 관련된 최초의 표준인 IEEE Std. C95.1-1991을 공표하였다<sup>[2]</sup>. 이후 일부 수정 및 개정을 통해 IEEE Std C95.1-1999와 IEEE Std C95.1-2004를 발표하였으며, 2003년까지 진행된 추가 연구를 통합하여 IEEE Std C95.1-2005를 발표하였다<sup>[3]</sup>. 그 후에도 임계치 및 국부 노출과 공간 최대 전력 분포에 대해 제정한 IEEE Std C95.1a-2010 및 북대서양 조약기구(North Atlantic Treaty Organization; NATO)의 표준화 협정(Standardization Agreement; STANAG) 2345를 대체하기 위해 국방 분야에서의 방사 노출 관련 표준인 IEEE Std C95.1-2345<sup>TM</sup>-2014를 발표하였다<sup>[4],[5]</sup>.

이렇게 1991년 이후 지속적으로 개정 중인 IEEE 표준에서는 RF 대역 인체보호프로그램에 대한 권고안인 IEEE Std C95.7<sup>TM</sup>-2005<sup>[6]</sup>의 RFSP(Radio Frequency Safety Program)의 제한 분류안에 근거하여 인체보호기준에 따른 접근구역(Access zone)을 정하여 [그림 2]와 같이 제시하고 있다. 접근구역은 크게 제한구역 및 비제한 구역으로 나누어지는데, 비제한 구역에는 zone 0이 포함되고, 제한구역에는 zone 1, zone 2, zone 3이 포함된다. 제한구역은 특정 인원에게만 접근이 허용되고 필요 시 특정 표지판 설치가 요구되며, 접근구역에 대한 허용 기준 및 특징에 대해서는 <표 1>에 정리하였다.

이 때 각 구역(Zone) 경계에 대한 기준 레벨은 IEEE 표준의 인체유해기준에 따라 정해진다. IEEE 표준에서는 인체유해기준 레벨을 표기하기 위해 두 가지 용어를 사용하고 있기 때문에 인체유해기준 레벨에 대해 이해하기 위해서는 이에 대한 이해가 필요하다. 첫 번째는 DRLs(Dosimetric Reference Level)로 전자파흡수율(Specific Absorption Rate; SAR) 및 인체에 입사된 전력 밀도에 대한 제한 규격으로 전기자극 및 열적작용으로 발생하는 인체유해성을 직접적으로 나타내는 값이다. 이에 반해 ERLs(Exposure Reference Level)은 공간상 노출된 전자기장 및 유도/접촉 전류에 대한 제한 규격으로



[그림 2] 접근구역(access zone)

<표 1> 접근구역에 대한 허용 기준 및 특징

구분	상세 구분	허용 기준 및 특징	표지판 표시
비제한 구역	Zone 0	- 일반인 포함 모두에게 개방	Information
제한 구역	Zone 1	- 전자파 유해성에 대해 알고 있는 군 관계자 이상으로 제한	Notice
	Zone 2	- 임무 기반의 전문가로 제한	Caution
	Zone 3	- 접근 금지 구조물 설치 (가능할 경우) - 특정 의료 목적으로만 허용	Warning or danger

DRL을 만족할 수 있도록 유도 계산된 값이다.

전자파에 의한 인체 유해성 중 열적작용의 경우, 전자기파가 인체에 입사될 때 전자기파에 의한 온도 변화로 감지되며, 이는 전자파흡수율(Specific Absorption Rate; SAR)로 나타낼 수 있기에 IEEE 표준 및 ICNIRP 표준에서는 이를 기준(직접

인의 경우, 전신 기준 4.0 W/kg)으로 하고 있으며, 둘 다 동일하다. 그러나 이를 적용하는 것은 주파수마다 전파의 특성 및 인체에서의 작용 또한 달라지기에 이에 대한 적용이 가능한 주파수 대역은 100 kHz~3 GHz이다. 이보다 높은 주파수 대역(3 GHz~300 GHz)에서는 전력 밀도로 나타내게 된다(이는 ERLs와 동일하기에 3 GHz 이상에서는 ERLs와 DRLs가 동일하다.) IEEE 표준에서는 이에 대해 DRLs라는 용어를 통해 기준 레벨을 제시하고 있으며, <표 2>는 100 kHz~3 GHz 대역에서의 DRLs에 대해 전자파흡수율로 나타낸 표이다. 전신의 경우, 전자파흡수율 기준 4 W/kg에 안전인자 10을 고려하여 Zone 1에서의 기준레벨이 SAR 0.4 W/kg으로 설정되어 있고, 국부 노출로 사지(팔다리)만 노출된 경우 20 W/kg을 제시하고 있다.

이 때 전자파흡수율은 인체 실험을 통해 측정이 어려워 동물 실험 또는 대체 물질에 대한 실험을 통해 결정된 값이기 때문에 각각의 기준에 대해 명시하고 있는데, <표 2>의 비고란에 보듯이 국부 노출에 대한 전자파흡수율의 경우, 임의 인체 조직 10 g에 대해 측정된 후 이를 평균한 최대값을 적용하여 도출한 값이다.

그러나 전자파 방사에 의한 열적작용에 대해 전자파흡수율을 직접 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에, DRLs로부터 유도된 ERLs(Exposure Reference Level) 또한 제시하고 있다. ERLs는 측정이 보다 용이하도록 DRLs로부터 유도된 전기장(E), 자기장(H), 전력밀도(S)로 그 기준을 표시하고 있다. <표

3> 및 <표 4>는 100 kHz~300 GHz 주파수 대역에서의 Zone 0과 Zone 1에 대한 ERLs를 나타낸 표이다. <표 3> 및 <표 4>에서 보듯이, 약 300 MHz 이하에서는 전기장 및 자기장과 그에 대한 전력 밀도를 제시하고 있으며, 그 이상 대역에서는 전력 밀도만으로 나타내고 있다.

여기서 Zone 0에 대한 ERL 값은 일반인에 대한 기준 레벨, Zone 1에 대한 ERL 값은 직업인에 대한 기준 레벨로 보면 되며, 1.2 GHz의 경우  $f_M$ 으로는 1,200이 되며,  $f_G$ 로는 1.2가 된다.

### 2-2 국내 전자파 인체보호기준

국내 전자파 인체보호기준은 현재 2003년 8월 29일 미래창조과학부에서 고시한 기준(제2013-118호)<sup>[7]</sup>가 가장 최신이며, 국민이 안심하는 전자파 환경 조성을 위한 다양한 연구 및 정책을 시행 중에 있다. 현재까지는 주로 무선 기지국 및 핸드폰과 같은 무선기기들에 대한 전자파 영향에 보다 중점을 두고 있으나, 고출력 전자파에 장시간 노출되는 직업인에 대한 실태조사 및 평가기준/방법 등을 마련 중이며, 2017년엔 직업인 보호 가이드라인 수립/적용할 예정에 있다<sup>[1]</sup>.

국내 전자파 인체보호기준은 ICNIRP 표준을 기반으로 하고 있다. 전자파흡수율의 경우, IEEE 표준 및 ICNIRP 표준이 동일하기에 <표 5>의 국내 전자파흡수율 기준은 <표 2>의 IEEE DRLs와 동일함을 볼 수 있다. 그러나 전자파 강도에 대한 기준은 IEEE 표준과 다소 상이하다. 이에 대해 어느 표준이 더 정확하다고 얘기하기는 어려우며, 나라별/기관별로 기반으로 하는 표준이 다르기에 상황에 맞는 기준을 선택하는 것이 중요하다.

<표 5>는 국내 전자파흡수율에 대한 기준(제4조 관련)을 나타낸다. 적용 주파수 범위는 IEEE 표준과 상이하지만, 그 기준 값은 IEEE 표준과 동일하다.

앞서 IEEE 표준에서와 마찬가지로 전자파흡수율은 전자파 인체영향을 나타내는 중요한 파라미터이긴 하지만 측정이 어렵기에 국내 전자파 인체보호기준에서도 일반인 및 직업인에 대한 전자파 강도 기준을 두어 관리하고 있으며, 전기장, 자기장, 전력밀도로 그 기준을 표시하였다. <표 6> 및 <표 7>은 각각 일반인과 직업인에 대한 전자파 강도 기준을 주파수 별로 정리한 표이다. 전자파 강도 기준의 경우, 전자파흡수율

<표 2> 100 kHz~3 GHz 대역에서의 DRLs (IEEE 표준)

Condition		Zone 0 (unrestricted environments) SAR <sup>a</sup> (W/kg)	Zone 1 (restricted environments) SAR <sup>a</sup> (W/kg)
Whole-body exposure	Whole-body average	0.08	0.4
Localized exposure	Localized (peak spatial-average) <sup>b</sup>	2	10
	Extremities <sup>c</sup> and pinnae	4	20

Note: For definition of each of the zones.

<표 3> 100 kHz~300 GHz 대역 Zone 0에 대한 ERLs (IEEE 표준)

Frequency range (MHz)	Electric field strength (E) (V/m)	Magnetic field strength (H) (A/m)	Power density (S) E-field, H-field (W/m <sup>2</sup> )	Averaging time  E  <sup>2</sup> ,  H  <sup>2</sup> or S (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	0.0636f <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	-	-	6.43×10 <sup>-4</sup> f <sub>G</sub> <sup>2.096</sup>	3.925×10 <sup>5</sup> f <sub>G</sub> <sup>2.572</sup>	

Note 1: Tabulated values are rms values.

Note 2: f<sub>M</sub> is the frequency in MHz, f<sub>G</sub> is the frequency in GHz.

<표 4> 100 kHz~300 GHz 대역 Zone 1에 대한 ERLs (IEEE 표준)

Frequency range (MHz)	Electric field strength (E) (V/m)	Magnetic field strength (H) (A/m)	Power density (S) E-field, H-field (W/m <sup>2</sup> )	Averaging time  E  <sup>2</sup> ,  H  <sup>2</sup> or S (min)	
0.1~1.0	1,842	16.3/f <sub>M</sub>	(9,000; 100,000/f <sub>M</sub> <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>	6	
1.0~30	1,842/f <sub>M</sub>	16.3/f <sub>M</sub>	(9,000/f <sub>M</sub> <sup>2</sup> , 100,000/f <sub>M</sub> <sup>2</sup> )	6	
30~100	61.4	16.3/f <sub>M</sub>	(10; 100,000/f <sub>M</sub> <sup>2</sup> )	6	
100~300	61.4	0.163	10	6	
300~3,000	-	-	f <sub>M</sub> /30	6	
3,000~30,000	-	-	100	19.63/f <sub>G</sub> <sup>1.079</sup>	
30,000~300,000	-	-	100	25.24/f <sub>G</sub> <sup>0.476</sup>	

Note 1: All values are rms values.

Note 2: f<sub>M</sub> is the frequency in MHz, f<sub>G</sub> is the frequency in GHz.

<표 5> 국내 전자파흡수율(SAR) 기준

주파수	구분	전자파흡수율 기준 (W/kg)		
		전신	머리/몸통	사지
100 kHz~10 GHz	일반인	0.08	1.6	4
	직업인	0.4	8	20

과 달리 IEEE 표준과 상이하다.

### 2-3 IEEE 표준과 국내 전자파 인체보호기준 비교

앞서 전자파 인체보호를 위한 IEEE 표준 및 국내 전자파 인체보호기준에 대해 알아보았다. 이 중 IEEE 표준의 ERLs 및 국내의 전자파강도 기준의 경우 상이할 뿐 아니라, 실제

<표 6> 일반인에 대한 전자과강도 기준(제3조 제1항 관련)

주파수 범위	전기장 강도 (V/m)	자기장 강도 (A/m)	자속밀도 (μT)	전력밀도 (W/m <sup>2</sup> )
1 Hz 이하	-	3.2×10 <sup>4</sup>	4×10 <sup>4</sup>	
1 Hz 이상~8 Hz 미만	10,000	3.2×10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>	4×10 <sup>4</sup> /f <sup>2</sup>	
8 Hz 이상~25 Hz 미만	10,000	4,000/f	5,000/f	
0.025 kHz 이상~0.8 kHz 미만	250/f	4/f	5/f	
0.8 kHz 이상~3 kHz 미만	250/f	5	6.25	
3 kHz 이상~150 kHz 미만	87	5	6.25	
0.15 MHz 이상~1 MHz 미만	87	0.73/f	0.92/f	
1 MHz 이상~ 10 MHz 미만	87/f <sup>1/2</sup>	0.73/f	0.92/f	
10 MHz 이상~400 MHz 미만	28	0.073	0.092	2
400 MHz 이상~2,000 MHz 미만	1.375f <sup>1/2</sup>	0.0037f <sup>1/2</sup>	0.0046f <sup>1/2</sup>	f/200
2 GHz 이상~300 GHz 미만	61	0.16	0.20	10

Note 1: Tabulated values are rms values.

Note 2: f<sub>M</sub> is the frequency in MHz, f<sub>G</sub> is the frequency in GHz.

<표 7> 직업인에 대한 전자과강도 기준(제3조 제2항 관련)

주파수 범위	전기장 강도 (V/m)	자기장 강도 (A/m)	자속밀도 (μT)	전력밀도 (W/m <sup>2</sup> )
1 Hz 이하	-	1.63×10 <sup>5</sup>	2×10 <sup>5</sup>	
1 Hz 이상~8 Hz 미만	20,000	1.63×10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup>	2×10 <sup>5</sup> /f <sup>2</sup>	
8 Hz 이상~25 Hz 미만	20,000	2×10 <sup>4</sup> /f	2.5×10 <sup>4</sup> /f	
0.025 kHz 이상~0.82 kHz 미만	500/f	20/f	25/f	
0.82 kHz 이상~65 kHz 미만	610	24.4	30.7	
0.065 MHz 이상~1 MHz 미만	610	1.6/f	2.0/f	
1 MHz 이상~ 10 MHz 미만	610/f	1.6/f	2.0/f	
10 MHz 이상~400 MHz 미만	61	0.16	0.2	10
400 MHz 이상~2,000 MHz 미만	3f <sup>1/2</sup>	0.008f <sup>1/2</sup>	0.01f <sup>1/2</sup>	f/40
2 GHz 이상~300 GHz 미만	137	0.36	0.45	50

Note 1: Tabulated values are rms values.

Note 2: f<sub>M</sub> is the frequency in MHz, f<sub>G</sub> is the frequency in GHz.

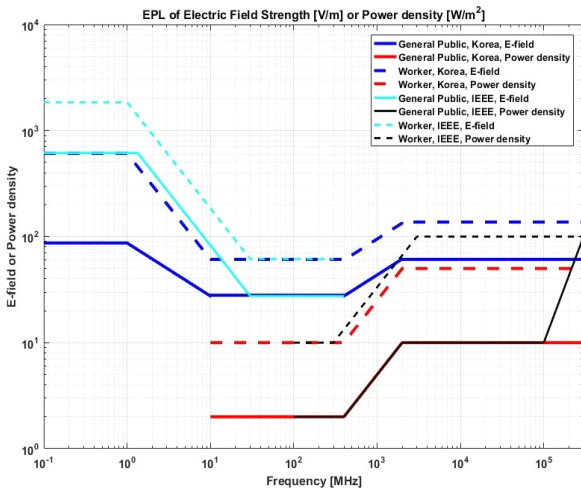
레이다와 같은 방사체를 가진 무기체계의 전자과 영향을 분석하기 위해서는 전기장 및 전력 밀도로 분석하는 것이 용이하기 때문에 이에 대한 기준을 비교하였다.

이 때 IEEE 표준의 경우, 전기장은 100 kHz~300 MHz에 대해 분석하였고, 전력 밀도는 100 MHz~300 GHz에 대해 분석하였다. 또한 Zone 0 기준값은 일반인에 대한 기준으로,

Zone 1 기준값은 직업인에 대한 기준으로 대치하여 표시하였다. [그림 3]은 IEEE 표준 및 국내 전자파 인체보호기준에 따른 전기장 및 전력밀도를 도식한 그림이다. [그림 3]에서 두 표준에 대해 비교하면, 전기장의 경우 100 kHz~30 MHz까지는 국내 표준이 IEEE 표준에 비해 보다 엄격함을 알 수 있다. 그러나 30~300 MHz 대역에서는 국내 표준과 IEEE 표준이 동일한 기준값을 갖는다. 300 MHz 이상일 경우, IEEE 표준에서는 전기장 기준은 제시하지 않고 있으며, 전력밀도에 대해 비교할 경우, 일반인에 대한 기준은 100 GHz 이하에서 동일하지만, 직업인에 대해서는 국내 표준이 IEEE 표준보다 엄격함을 알 수 있다. 따라서 일반적인 레이더 운용 주파수 대역이 2~10 GHz임을 감안하면, 일반인에 대한 기준은 동일하게 사용할 수 있으며, 직업인에 대해서는 국내 기준을 따를 시 안전거리가 보다 증가해야 함을 알 수 있다.

### Ⅲ. 레이더 제한구역 설정 방법

앞서 설명한 인체보호기준에 따라 레이더 방사위험 방지를 위한 제한구역 설정 방법에 대해 살펴본다. 우선 전자파 인체보호기준으로 제시되는 전력밀도 및 전기장/자기장을 원전계(far-field)와 근접전계(near-field)로 나누어 계산하는 방법에 대해 설명하고, 레이더 타입에 따라 적용하여 제한구역



[그림 3] IEEE 표준 및 국내 전자파 인체보호기준의 전기장 및 전력밀도 비교

설정하는 방법에 대해 설명한다.

#### 3-1 전력밀도 및 전기장/자기장 계산 방법

##### 3-1-1 원전계(Far-field)<sup>9)</sup>

전자파 인체보호기준에 대해 그 값이 전기장, 자기장, 전력밀도로 주어지므로 레이더 제한구역 설정을 위한 안전거리 계산에 앞서 전력밀도(W) 및 전기장(E)/자기장(H) 계산식에 대해 먼저 알아본다. 원전계에서 전력밀도는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$W = EIRP / (4\pi R^2) = P_r G / (4\pi R^2) \quad (1)$$

여기서  $EIRP$ 는 유효 등방사 전력(effective isotropically radiated power) [W],  $P_r$ 는 안테나에 전달된 전력 [W],  $G$ 는 안테나 이득,  $R$ 은 안테나로부터의 거리 [m]를 나타낸다. 안테나 이득은 모의 또는 측정값으로 도출이 가능하나, 안테나 크기로부터 다음과 같이 식 (2)로 도출이 가능하다.

$$G = 4\pi A_e / \lambda^2 \quad (2)$$

여기서  $\lambda$ 는 파장 [m]을 나타내고,  $A_e$ 는 안테나 유효 면적으로 안테나 물리적 크기( $A$ ) 및 안테나 효율( $\epsilon$ )로부터 다음과 같이 식 (3)으로 계산할 수 있다.

$$A_e = \epsilon A \quad (3)$$

또한, 만약 전자파 인체보호기준이 전기장 또는 자기장으로 주어질 경우, 원전계에서 다음과 같이 전력밀도와 전기장 및 자기장과의 관계를 이용해 식 (4)로 계산이 가능하다.

$$W = E^2 / \eta = H^2 \eta \quad (4)$$

여기서  $\eta$ 는 자유 공간에서의 저항값으로 377 ohms이다.

##### 3-1-2 근접전계(Near-field)<sup>10)</sup>

일반적으로, 전자기파의 전자기장 및 전력밀도를 나타낼

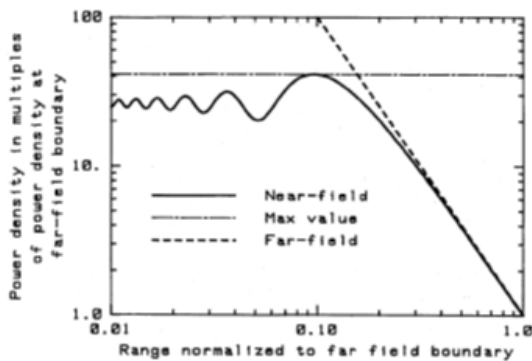
때는 평면파(plane wave) 특성을 갖는 원전계(far-field)를 가정한다. 그러나 실제로 안테나 근처에서는 전자기파가 평면파의 특성을 갖지 못하고 전기장 및 자기장의 위상이 매우 빠르게 변하는데, 이러한 공간을 근접전계(near-field)라고 한다. 앞서 살펴본 식 (1)~(4)는 원전계에서의 수식으로 만약 전자파 인체보호를 위한 제한구역의 안전거리가 원전계 거리보다 작을 경우 그 적용이 불가능하다. 따라서 이 경우, 다른 방법을 통해 안전거리를 계산해야 한다. [그림 4]는 Hansen에 의해 개발된 근사식을 이용하여 근접전계에서의 원전계 대비 상대 전력밀도를 나타낸다<sup>[8]</sup>. 이 때  $X(x$ 축) 또한 원전계 기준이 되는 거리( $R_o = 2D^2/\lambda$ )에 대한 상대 거리를 나타내며, 식 (5)와 같이 주어진다.

$$X = R/R_o = R/(2D^2/\lambda) \tag{5}$$

여기서  $D$ 는 안테나 반경 [m]을 나타낸다. [그림 4]를 보면, 원전계 기준 거리 대비 1/10 거리에서 전력밀도 비가 40인 것을 알 수 있다. 즉, 원전계 기준 거리에서의 전력밀도 대비 약 40배의 전력밀도라는 것을 알 수 있다. 따라서 안전거리가 근접전계 내에 존재할 경우, 원전계 기준 거리에서의 전력밀도를 계산 후 허용 가능한 최대 전력밀도비를 이용하여 안전거리를 설정할 수 있다.

### 3-2 레이더 타입에 따른 제한구역 설정을 위한 안전거리 계산 방법<sup>[9]</sup>

#### 3-2-1 CW 레이더



[그림 4] 원전계 기준 상대 거리에 따른 상대적 전력밀도

중심주파수 1.2 GHz에서 동작하는 0.5 m 안테나 반경 및 50W EIRP를 갖는 CW 레이더에 대해 제한구역의 안전거리를 계산하는 방법은 다음과 같다.

#### 1) 일반인에 대한 전자파 인체보호기준에 따른 최대 허용 전력밀도 계산

일반인에 대한 인체보호기준은 IEEE 표준 및 국내 전자파 인체보호기준이 동일하며, <표 3> 및 <표 6>으로부터 최대 허용 전력밀도를 계산한다.

$$W_{lim} = f_M/200 = 1,200/200 = 6 \text{ [W/m}^2\text{]} \tag{6}$$

#### 2) 최대 허용 전력밀도로부터 최소 안전거리 계산

식 (1)로부터 계산한 전력밀도가 최대 허용 전력밀도보다 작기 위한 최소 안전거리를 계산한다.

$$W = \frac{EIRP}{4\pi R^2} \leq W_{lim} \\ \Rightarrow R \geq \sqrt{\frac{EIRP}{4\pi W_{lim}}} = 0.814 \text{ m} \tag{7}$$

#### 3) 식 (7)에서 구한 최소 안전거리가 원전계 거리를 만족하는지 여부 체크

식 (7)에서 계산한 최소 안전거리가 원전계 거리를 만족하는지 여부를 체크하기 위해 먼저 원전계 거리를 계산한다.

$$R_o = 2D^2/\lambda = 2 \text{ m} \tag{8}$$

식 (8)로부터 식 (7)에서 계산한 최소 안전거리가 원전계 거리보다 작기 때문에 원전계가 아닌 근접전계로 계산해야 함을 알 수 있다.

#### 4) 만약 원전계 거리를 만족하지 못할 경우, 원전계 거리 대비 상대 거리 도출

원전계 거리를 만족하지 못했기 때문에 [그림 4]에서 상대적 전력밀도를 통해 원전계 거리 대비 상대 거리를 도출한

다. 이를 위해 먼저 원전계 거리에서의 전력밀도를 계산한다.

$$W = \frac{EIRP}{4\pi R_0^2} = 0.995 \quad [W/m^2] \quad (9)$$

이 때 최대 허용 전력밀도는  $6 W/m^2$ 이므로 원전계 거리에서의 전력밀도 대비 약 6배가 된다. [그림 4]에서 6배에 해당하는 상대 거리는 0.4배이므로, 원전계 거리 2 m의 0.4배인 0.8 m가 최소 안전거리가 된다.

### 3-2-2 펄스 레이다

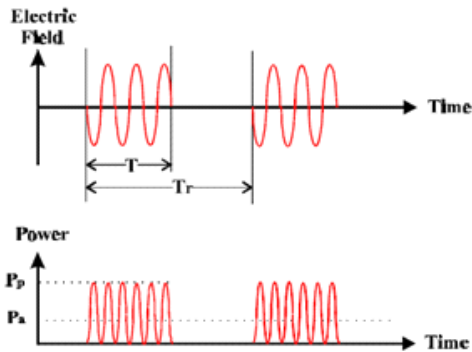
펄스 레이다의 경우, CW 레이다와 달리 계속된 시간 동안 방사되지 않기 때문에 이를 고려할 필요가 있다. [그림 5]는 펄스 레이다의 신호 개념을 나타낸다.

[그림 5]에서 한 펄스에 대해 총 시간 대비 펄스 구간 비는 duty factor( $F$ )이며, 레이다 펄스의 반복 주기(Pulse Repetition Frequency; PRF,  $F_p$ )와는 식 (10)과 같은 관계를 갖는다.

$$F = \frac{T}{T_r} = Tf_p \quad (10)$$

즉, [그림 5]에서와 같이 펄스 레이다에선 전력이 시간에 따라 달라지기 때문에 평균 전력밀도( $W_a$ )를 아래와 같이 계산하며, 이를 식 (1)에 적용하여 CW 레이다와 동일한 방법으로 계산한다.

$$W_a = FW_p \quad (11)$$



[그림 5] 펄스 레이다의 신호 개념

### 3-2-3 스캐닝(Scanning) 레이다

일반적인 탐색 레이다들은 회전하며 스캐닝하게 된다. 따라서 이를 고려한 유효 전력밀도( $W_m$ )는 고정 시 측정된 전력밀도( $W_s$ )로부터 식 (12)와 같이 계산할 수 있다.

$$W_m = KW_s \quad (12)$$

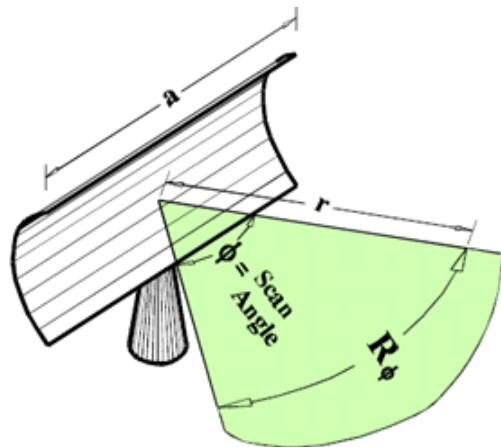
여기서  $K$ 는 안테나 회전 감소 요인(rotational reduction factor)로 근접전계와 원전계에서 각각 식 (13)과 같이 계산된다.

$$\begin{cases} K = a/R_\phi & \text{근접전계} \\ K = \theta_{3dB}/\phi & \text{원전계} \end{cases} \quad (13)$$

여기서  $a$ 는 안테나 크기 [m],  $R_\phi$ 는 거리  $r$ 에서의 호길이 [m],  $\theta_{3dB}$ 는 3 dB 빔폭,  $\phi$ 는 스캔 각도를 나타내며, [그림 6]은 이에 대한 개념을 나타낸다. 따라서 스캐닝 레이다의 경우, 근접전계 및 원전계에 따라 식 (13)을 적용하여 유효 전력밀도를 계산한 후, 이를 식 (1)에 적용하여 CW 레이다와 동일한 방법으로 계산하면 된다.

## IV. 맺음말

최근 고출력 방사체를 가지는 군사무기체계의 전자파 방



[그림 6] 스캐닝 레이다에서 회전 감소 요인(rotational reduction factor) 개념



사에 의한 인체 유해성에 대한 관심이 날로 높아지고 있으며, 이러한 추세에 따라 전자파 인체보호를 위한 규제가 날로 강화되고 있는 추세에 있다. 이러한 전자파 방사 위험에 대해 국제기구인 IEEE 및 ICNIRP에서는 각각 표준을 만들어 공표하고 있으며, 그 표준을 기반으로 각 나라별/기관별로 전자파 인체보호기준을 정해 시행 중에 있다. 이러한 전자파 방사 위험에 관한 표준 및 기준에 대해 절대적인 표준은 없지만, 개발 무기체계의 상황에 맞추어 적절한 기준을 선택하고, 그에 대한 기준을 만족하는 것이 중요하다.

본 고에서는 이 때 적절한 기준 선택에 참고하기 위해 IEEE 표준과 국내 전자파 인체보호기준에 대해 제시하고, 이를 살펴보고 비교하였다. 또한, 기준 선택 후에는 개발하는 레이더에 맞게 제한구역을 설정하기 위한 안전거리 계산 방법에 대해 레이더 타입별로 기술하였다. 이러한 내용을 참고로 레이더 개발 시 제한구역 설정에 대해 제시하고, 검증함으로써 전자파 방사 위험으로부터 안전한 레이더 개발에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 참 고 문 헌

[1] 미래창조과학부, "전자파 인체보호 종합대책", 2014년 8월.  
 [2] IEEE Standard C95.1-1991, *IEEE Standard for Safety Levels*

*with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, 1992.  
 [3] IEEE Standard C95.1<sup>TM</sup>-2005, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, Apr. 2006.  
 [4] IEEE Standard C95.1a<sup>TM</sup>-2010, *IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, Mar. 2010.  
 [5] IEEE Standard C95.1-2345<sup>TM</sup>-2014, *IEEE Standard for Military Workplaces - Force Health Protection Regarding Personnel Exposure to Electro, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*, May. 2014.  
 [6] IEEE Standard C95.7-2005, *IEEE Recommended Practice for Radio Frequency Safety Programs, 3 kHz to 300 GHz*, Mar. 2006.  
 [7] 미래창조과학부, 제2013-118호, "전자파 인체보호기준", 2013년 8월.  
 [8] B. Edde, *Radar-Principles, Technology, Applications*, Prentice Hall PTR, pp. 673-677, 1993.  
 [9] Minister of Public Works and Government Services, Canada, *Limits of Human Exposure to Radio frequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz*, 1999.

≡ 필자소개 ≡

문 현 옥



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)  
2007년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)  
2016년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
2014년 3월~현재: LIG 넥스원 레이더 연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더, 전파전파

선 응



1986년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)  
1988년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)  
2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
1988년 2월~2000년 6월: 국방과학연구소 선임연구원  
2009년 3월~현재: LIG 넥스원 레이더 연구소

소장

[주 관심분야] 레이더, SAR, 신호처리

이 종 현



1997년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)  
1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
2005년 1월~현재: LIG 넥스원 레이더 연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더, 배열신호처리, 병렬신호처리