

## 국제비전리방사선 보호위원회 저주파 전자계 인체보호기준 동향

■ 민 석 원 / 순천향대학교 교수

요즘 송전선로 및 변전소 시설과 같은 송변전 설비는 일반 국민에게는 혐오시설로 간주되어 건설을 반대하지 않으면 이상할 정도로 거의 모든 지역에서 많은 민원이 발생하고 있다. 이 민원은 지역주민과 전력회사 간 또는 지역주민 간에도 갈등을 일으키는 요소가 되고 있다. 민원의 원인 중에 하나가 송변전 설비에서 발생하는 전자계이고 지역주민들은 송변전 설비 주변에 살면 이의 영향으로 백혈병, 폐암, 위암, 간암 등의 모든 암에 걸린다고 주장하지만 아직까지 전자계의 안전성에 관해 과학적으로 명확한 결론은 나지 않은 상태이다. 이와 같은 전자계 인체영향에 대해 세계적으로 권위 있는 전문가가 모여 중립적이고 투명하게 정보를 제시하고 있는 기관으로 국제비전리방사선 보호위원회(ICNIRP; International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)라는 단체가 있다. ICNIRP은 “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”란 논문을 Health Physics 1998년 4월호에 게재하였으며 EU를 비롯한 우리나라, 영국, 독일 등 세계 대부분의 나라에서는 현재까지 이 가이드라인을 각국의 보호기준으로 채택하고 있으며 세계보건기구도 2007년 6월 발표한 Factsheet No 322를 통해 이 기준을 반드시 채택할 것을 권고하였다. 그런데 2010년 11월 ICNIRP은 Factsheet를 통해 1998년의 가이드라인과 다른 “1 Hz에서 100 kHz까지의 저주파수 시변

전자계의 노출제한”에 대한 새로운 가이드라인을 발표하고 이의 주요 내용 및 과학적 배경을 제시하였다. 본 기고에서는 ICNIRP에서 Health Physics 2010년 12월호에 발표한 “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)”란 논문을 중심으로 새로운 가이드라인과 1998년 가이드라인과의 차이점, 과학적 배경 등을 소개하고자 한다.

우선 대부분의 전기 엔지니어들은 ICNIRP이 생소할 것으로 생각되어 먼저 이것부터 간략하게 소개하겠다. ICNIRP은 14명의 위원으로 구성된 본부 위원회와 역학(epidemiology), 생물학, 물리학 및 공학과 Optical radiation(자외선, 가시광선, 적외선, 레이저)을 다루는 4개의 상설 위원회로 구성된 독립 과학 전문단체이다. 비전리 방사선 노출로 인한 잠재적인 인체 위험에 대한 정보와 권고사항을 관심있는 모든 사람에게 공포하는 것을 목적으로 하고 있으며, 시불변 및 시변 전자계와 마이크로 웨이브를 포함한 라디오 주파수 전자계 복사, 초음파 및 Optical radiation을 포함한 비전리 방사선을 관리 대상으로 하고 있다. 이들 분야에 대해 세계보건기구와 공동으로 수행된 위험평가와 연관된 결과는 ICNIRP 가이드라인으로 발표되며 전자계, 레이저, 자외선, 초음파 등의 노출 제한 가이드라인이 그 예다.

이번에 발표된 가이드라인은 1998년에 발표된 이전 가이드라인에서 1 Hz부터 100 kHz까지 부분을 대체하

고 있다. 이 가이드라인은 현재의 과학적 지식을 토대로 세계보건기구(WHO)와 ICNIR의 폭넓은 리뷰를 통해 도출되었으며 여기서는 개정된 내용을 중심으로 설명하였다.

저주파수 시변 전자계와 인체와의 주된 상호작용은 인체조직에 전계를 비롯하여 관련 전류를 유도하는 것이며, 저주파수 전계 노출은 표면전하 효과를 일으킨다. 그리고 저주파수 전계와 자계 노출로 인해 유도되는 것을 포함한 전기자극에 대해 전기적으로 흥분하기 쉬운 신경과 근육조직의 반응은 인과관계가 잘 정립되어 있으며, 비균질 인체모델과 자기공명계에 노출된 자원자의 자료로부터 말초신경을 자극하기 위한 최소 임계 전계가 4-6 V/m임이 계산되었다. 그리고 신경 또는 근육의 직접적인 흥분에 필요한 임계치보다 낮은 전계에서 가장 두드러지게 나타나는 인체반응으로는 시야 주변에 연약한 깜박거리는 빛이 인지되는 자기 안내섬광(眼内閃光) 유도현상을 들 수 있다. 이것은 유도전계와 망막에서 전기적으로 흥분하기 쉬운 세포와의 상호작용의 결과로 짐작되며 망막의 안내섬광 유도전계 임계치는 20 Hz에서 50 mV/m에서 100 mV/m 사이에 있을 것으로 추정된다. 그리고 자원자의 뇌의 전기적 활동, 인지력, 수면, 기분 등에 대한 신경 행동학적 영향에 대한 증거는 분명하지 못하다.

이처럼 현재까지 얻어진 과학적 데이터를 종합하여 볼 때 저주파수 전자계가 신경 내분비계에 영향을 미치는 것으로는 볼 수 없으며, 저주파수 전자계 노출과 파킨슨병, 다발성 경화증, 심장혈관계 질병간의 관계에 대한 증거를 비롯하여 저주파수 전자계 노출과 알츠하이머병, 루게릭병 간의 관계에 대한 증거는 결론에 이르지 못하고 있다. 또한, 전자계 노출과 성장 및 생식 영향 간의 관계에 대한 증거 또한 근거가 매우 미약하다.

한편 1980년대와 1990년대에 발표된 많은 역학 보고서는 50-60 Hz 자계 장기노출이 소아백혈병 위험증가와 연관관계가 있을지 모를을 시사한 사례가 있다. 두 개의 분석자료에 의하면 평균 자계노출이 0.3-0.4 μT 이상일 때 과도한 위험이 발생할 수 있음을 설명하고

있으나, 이 결과는 편향적 선택, 교락 변수, 우연으로도 설명되어질 수 있다. 또한, 생체물리학적 기전이 확인되지 않고 있고 동물과 세포 실험연구로부터의 시험결과가 50-60 Hz 자계노출이 소아백혈병의 원인이라는 주장을 논리적으로 증명해 보이지 못하고 있다.

따라서 ICNIR의 견해는 저주파수 자계의 장기노출이 소아백혈병 위험증가와 연관되었다는 현재까지의 존재하는 과학적 증거는 너무 미약하여 노출 가이드라인의 토대로 할 수 없다는 입장이며, 다만 표면전하의 인지, 신경과 근육조직의 직접적인 자극, 망막 안내섬광 등이 유일한 인과관계가 잘 정립된 부정적인 영향요소이므로 이것을 토대로 가이드라인 제시의 기초로 삼았다.

이상과 같이 요약한 과학적 증거에 대한 검토를 토대로 ICNIR은 다음의 노출기준을 추천했다.

### 기본 제한치(Basic restrictions)

기본 제한치는 인과관계가 정립된 건강영향과 직접적으로 관련된 물리량을 토대로 정해진 값으로 1998년 가이드라인은 표 1과 같이 1 Hz에서 10 MHz 사이를 신경 시스템의 기능에 대한 영향을 방지하기 위하여 전류밀도로 기본 제한치를 제시했다.

이에 반해 2010년에 제시된 새로운 ICNIR 가이드라인은 표 2와 같이 기본 제한치를 인체 내부 유도 전계강도로 나타내었으며 차이점은 다음과 같다.

- 인체 내부 유도 전계강도가 생물학적 영향을 결

표 1 1998년 ICNIR 가이드라인의 10 MHz까지의 시변 전자계의 기본 제한치

노출 특성	주파수 범위	머리와 몸통의 유도전류 밀도 (mA/m <sup>2</sup> , ms)
직업인 노출	1 Hz까지	40
	1-4 Hz	40/f
	4 Hz-1 kHz	10
	1-100 kHz	f/100
일반인 노출	100 kHz-10 MHz	f/100
	1 Hz까지	8
	1-4 Hz	8/f
	4 Hz-1 kHz	2
	1-100 kHz	f/500
	100 kHz-10 MHz	f/50

※ 여기서의 단위는 Hz이다.

정하는 물리량이기 때문에 유도 전류밀도 대신에 유도 전계강도로 기본 제한치를 제시했다. 1998년 당시에는 대부분의 실험 데이터가 유도 전류밀도를 토대로 하였기 때문에 이전의 건강위험 평가가 유도 전류밀도로 이루어졌다. 그러나 지금은 인체 내부 유도 전계강도를 가이드라인에 사용할 수 있을 정도로 충분한 신뢰성과 정보를 얻을 수 있게 되어 이를 적용하게 되었다.

- 1998년 가이드라인은 신경 시스템의 기능에 대한 영향을 방지할 수 있도록 제시되었고 중앙신경 시스템 조직 내의 유도 전류밀도 제한치만 추천되었다. 그리고 안내섭광은 부정적인 건강영향으로 고려되지 않았었다. 반면 이번에 ICNIRP에서는 망막에 대한 영향을 뇌의 영향 모델로 고려하였으며 안내섭광 임계치를 노출 제한 기본값으로 삼았다. 또한, 말초신경과 중앙 유수신경(有髓神經)에 대한 자극 영향을 포함하면서 이것으로 몸통의 모든 조직의 노출 제한치를 결정하였다. 이처럼 제한치들은 현재까지의 과학적 증거를 토대로 하였으며 이전 가이드라인의 유도 전류밀도에 조직 도전을 바탕으로 단순하게 변환한 것이 아니다.

표 2에서 10 Hz에서 25 Hz까지의 주파수 범위의 직업인 내부 유도 전계강도는, 작업자 머리의 중앙 신경 시스템(즉, 뇌와 망막)에 유도되는 전계가 망막 안내섭광을 일으키지 않도록 50 mV/m 보다 작게 가이드라인을 제시하였다. 이 제한사항들은 뇌의 기능에 대한 어

떤 일시적인 영향도 미치지 않아야 하겠지만 이 영향들을 부정적인 건강 영향요소으로는 고려하지 않았다. 또한 ICNIRP은 이것들이 어떤 작업환경에서 방해가 될 수 있는 요소임은 인식했지만 부가적인 저감계수를 적용하지는 않았다. 그리고 400 Hz에서 3 kHz까지는 말초신경과 중앙 유수신경(有髓神經) 자극을 피하기 위하여 인체의 모든 부분에 유도되는 전계강도를 800 mV/m 이하로 제한되도록 하였다. 작업자가 가능한 일시적 영향에 대해 알고 있는 통제되는 환경하에서, 1 Hz에서 400 Hz까지의 범위의 노출은 말초신경과 중앙 유수신경(有髓神經) 자극을 피하기 위하여 인체의 머리와 몸통에 유도되는 전계강도를 800 mV/m 이하로 제한되도록 하였다. 이 값은 불확정 요소를 고려하여 위에서 기술한 말초신경 자극 임계치인 4 V/m에 5의 저감계수를 적용하여 도출되었다.

10 Hz에서 25 Hz까지의 주파수 범위의 일반인 내부 유도 전계강도는, 일반인 머리의 중앙 신경시스템(즉, 뇌와 망막)에 유도되는 전계가 망막 안내섭광을 일으키지 않도록 10 mV/m 보다 작게 하였다. 불확실한 요소를 고려하여 안내섭광의 임계치인 50 mV/m에 5의 저감계수를 적용하였다.

### 노출 기준치(Reference levels)

노출 기준치는 기본 제한치를 직접 평가하는 것이 어렵기 때문에 실제의 노출량을 평가하기 위해 제시되었다. 노출 기준치는 측정 및 (또는) 계산으로 기본 제한치로부터 유도되며 전계강도, 자계강도, 자속밀도 등으로 주어진다.

표 3은 1998년에 ICNIRP이 제시했던 1 Hz에서 10 MHz 사이의 시변 전자계 노출 기준치이며 표 4는 이번 2010년에 새롭게 제시한 10 MHz 사이의 시변 전자계 노출 기준치이며 두 기준치 간의 주된 차이는 다음과 같다.

- 1998년에는 도시메트릭 모델로 인체를 단순한 기하학적 모델로 삼았으나 2010년 새 가이드라인은 상세한 해부학적 인체모델을 토대로 한 모의계산 데이터를 이용하였다.

표 2 2010년 ICNIRP 가이드라인의 10 MHz까지의 시변 전자계의 기본 제한치

노출 특성		주파수 범위	내부 유도 전계강도 (V/m, rms)
직업인 노출	머리의 중앙 신경 시스템 조직	1-10Hz까지	0.5/f
		10-25 Hz	0.05
		25-400 Hz	$2 \times 10^{-3} f$
		400 Hz-3 kHz	0.8
머리와 몸통의 모든 조직	3 kHz-10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} f$	
	1 Hz-3 kHz	0.8	
일반인 노출	머리의 중앙 신경 시스템 조직	3 kHz-10 MHz	$2.7 \times 10^{-4} f$
		1-10Hz까지	0.1/f
		10-25 Hz	0.01
		25-1000 Hz	$4 \times 10^{-4} f$
		1000 Hz-3 kHz	0.4
머리와 몸통의 모든 조직	3 kHz-10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$	
	1 Hz-3 kHz	0.4	
머리와 몸통의 모든 조직	3 kHz-10 MHz	$1.35 \times 10^{-4} f$	

※ 여기서 f의 단위는 Hz이다.

표 3 1998년 ICNIRP 가이드라인의 10 MHz까지의 시변 전계계의 노출 기준치

노출 특성	주파수 범위	전계강도(V/m)	자계강도(A/m)	자속밀도( $\mu$ T)
직업인 노출	1 Hz까지	-	$1.63 \times 10^5$	$2 \times 10^5$
	1-8 Hz	20,000	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$2 \times 10^5 / f^2$
	8-25 Hz	20,000	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^4 / f$
	0.025-0.82 kHz	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	
일반인 노출	1 Hz까지	-	$3.2 \times 10^4$	$4 \times 10^4$
	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 kHz	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

※ 여기서의 단위는 주파수 범위에 표시된 것과 동일하다.

표 4 2010년 ICNIRP 가이드라인의 10 MHz까지의 시변 전계계의 노출 기준치

노출 특성	주파수 범위	전계강도(V/m)	자계강도(A/m)	자속밀도(T)
직업인 노출	1-8 Hz	20	$1.63 \times 10^5 / f^2$	$0.2 / f^2$
	8-25 Hz	20	$2 \times 10^4 / f$	$2.5 \times 10^{-2} / f$
	25 Hz-300 Hz	$5 \times 10^2 / f$	$8 \times 10^2$	$1 \times 10^{-3}$
	300 Hz-3 kHz	$5 \times 10^2 / f$	$2.4 \times 10^2 / f$	0.3/f
	3 kHz-10 MHz	$1.7 \times 10^{-1}$	80	$1 \times 10^{-4}$
일반인 노출	1-8 Hz	5	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$\times 10^2 / f^2$
	8-25 Hz	5	$4 \times 10^3 / f$	$5 \times 10^{-3} / f$
	25-50 Hz	5	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
	50 Hz-400 Hz	$2.5 \times 10^2 / f$	$1.6 \times 10^2$	$2 \times 10^{-4}$
	400 Hz-3 kHz	$2.5 \times 10^2 / f$	$6.4 \times 10^1 / f$	$8 \times 10^{-2} / f$
	3 kHz-10 MHz	$8.3 \times 10^{-2}$	21	$2.7 \times 10^{-5}$

※ 여기서의 단위는 Hz이다.

- 또한, 도시메트릭 모델 뿐 만 아니라 기본 제한치도 개정되어 노출 기준치가 몇 곳에서 바뀌었다. 자계 노출 제한치는 보수적인 경향이 다소 적고 전계 노출 제한치는 몇몇 예외는 있으나 기본적으로 변화가 없다. 예로 60 Hz의 직업인 노출 기준치를 두 표를 통해 비교해 보면, 1998년의 이전 전계와 자계 노출 기준치는 8.33 kV/m와 416.67  $\mu$ T 이었으나 2010년의 새 기준에서는 8.33 kV/m와 1 mT로 자계 기준치가 약 2.4 배 완화되었다. 또한 60 Hz의 일반인 노출 기준치도 1998년의 이전 전계와 자계 노출 기준치는 4.167 kV/m와 83.3  $\mu$ T 이었으나 2010년의 새 기준에서는 4.167 kV/m와 200  $\mu$ T로 자계 기준치가 약 2.4배 완화

되었다.

그렇지만, 상기 노출 기준치 외의 접촉전류, 전계와 자계가 동시에 노출된 경우, 다중 주파수계, 비정현파계 등에 관한 적용법은 이전 가이드라인과 변화가 없다.

### 보호대책

ICNIRP은 이 가이드라인의 모든 면을 준수하면 전계에 노출된 사람의 보호를 보장할 수 있음을 언급하였다. 노출이 기본 제한치를 초과하는 상황을 초래할 때는 적절한 보호대책이 수립되어야 한다. 행정적인 조치와 함께 공학적인 조치가 취해져야 한다. 작업장에서 개인적인 보호대책을 쓸 수도 있지만 이것은 마지막 수단이 되어야 한다. 또한, 화염물질의 스파크로 인한 점화로부터 생기는 폭발, 화재, 전자폭약 기구의 폭발, 의학 전자 기기의 방해를 방지하기 위한 법규를 시행하는 것이 필수적이다.

### 장기영향

위에서 언급 것과 같이, 역학연구를 통해 일상의 만성 저강도 전원 주파수 자계노출이 소아백혈병의 위험증가와 연관이 있다는 것을 알았다. 그러나, 실험연구가 이 연관성과 자계와 소아백혈병 간의 인과관계를 뒷받침하지 못할 뿐 만 아니라 어떤 다른 장기 영향도 인과관계가 있음을 정립해 내지 못하고 있다. 이처럼 정립된 인과관계의 부재로 인해 역학결과가 기본 제한치에서 다루어지고 있지 않다. ICNIRP은 역학결과가 많은 나라의 주민들에게 불안을 일으키고 있는 지를 잘 알고 있다. ICNIRP의 생각은 이 불안이 국가의 위험관리체계 내에서 가장 잘 다루어져야 한다는 것이다. 일반적으로 위험관리는 사회적, 경제적, 정치적 이슈를 포함한 많은 다른 면을 토대로 하고 있다. 이 맥락에서 ICNIRP은 과학적으로 기초한 조언만을 제시하였다. 예로 사전주의 정책을 포함한 다른 위험관리에 관한 조언은 세계보건기구 또는 다른 단체에 의해 주어지고 있다.