

전자기장 노출에 대한 인체 보호기준

한국전자과학회

I. 개요 및 목적

이 기준의 주요 목적은 건강에 유해한 영향으로부터 인체를 보호하기 위하여 전자기장에 대한 노출을 제한하는 데 있다. 건강에 유해한 영향은 개인이나 그 자식의 건강에 식별할 수 있는 손상을 초래하는 것을 말하며, 반면에 시험관 실험 및 생체실험 등의 생물학적 영향은 건강에 유해한 영향을 일으킬 수도 있고 일으키지 않을 수도 있다.

이 기준에서 전자기장의 직접적인 영향 및 간접적인 영향에 대한 연구결과를 기술하였는데, 직접적인 영향은 신체에 대한 전자기장의 직접적인 상호작용에서 비롯된 것이며, 간접적인 영향은 신체와 전위가 다른 물체와의 상호작용을 포함한다. 또한, 이 기준에서는 실험 및 역학 연구결과, 기본한계, 실제적인 위험 평가를 위한 기준 레벨 등을 기술하였으며, 주파수 300 GHz 이하의 전자기장에 대하여 일반인 및 직업인 모두에게 적용된다.

기준을 제정함에 있어서 과학적으로 확실한 보고서가 고려되어야 하며, 동물을 대상으로 한 실험으로부터 인간에 대한 영향을 외삽법으로 추정해야 한다. 이 기준의 제한치들은 과학적인 데이터만에 근거하고 있으며, 현재의 유용한 지식은 이 제한치들이 시변(時變) 전자기장에 대한 노출로부터 인체를 보호하는 적절한 레벨을 제시함을 보여주고 있다. 이 기준에서는 두 종류의 제한치를 나타내고 있다.

• 기본한계 : 확립된 건강 영향에 직접적으로 근거하고 있는 시변(時變) 전기장, 자기장, 전자기장의 노출한계를 "기본한계"라 한다. 전자기장의 주파수 의존성에 따라서 이 제한치를 규정하는 데 사용하는 물리적 양들은, 전류밀도(J), 전자파 흡수율(SAR), 전력밀도(S)이다.

• 기준레벨 : 이 레벨은 기본한계가 초과되는지를 판단하기 위하여 실질적인 노출 평가의 목적으로 제공된다. 일부 기준 레벨은 측정 및 수치적 계산을 이용하여 기본 한계치로부터 적절히 유도되었으며, 다른 일부는 전자기장 노출의 인지와 간접적인 유해 영향을 고려한 것이다. 유도된 양들은 전기장 강도(E), 자기장 강도(H), 자속밀도(B), 전

력밀도(S), 그리고 팔다리(四肢)를 통하여 흐르는 전류(I_L)로 표현된다. 인지 및 다른 간접적인 영향을 나타낸 양은 접촉전류(I_C)이며, 펄스 전자기장에 대해서는 전자파 흡수(SA)로 표현된다. 어떤 특수한 노출 상황에서 이러한 양들의 측정 또는 계산된 값들은 적절한 기준레벨과 비교될 수 있다. 기준레벨을 만족하면 관련된 기본한계를 만족시킬 것이다. 측정된 값이나 계산된 값이 기준레벨을 초과한다고 해서 기본한계를 반드시 초과하는 것은 아니다. 그러나 기준레벨이 초과될 때는 관련 기본한계를 만족하는지 조사하여야 하며, 부가적인 보호대책을 세워야 한다.

기본한계와 기준레벨을 설정하는데 있어서 적절한 안전계수가 도입되어야 하는데, 모든 주파수 영역 및 주파수 변조방식에 대해 안전계수를 확립하기에는 전자기장 노출에 대한 인간집단과 실험동물의 생체 및 건강 영향에 관한 정보가 불충분하다. 더구나, 적절한 조사량 측정법에 관한 지식의 결여로 인하여 적절한 안전계수의 설정에 어려운 점이 있다^[1]. 고주파 전자기장에 대한 안전계수를 설정하기 위해 다음과 같은 일반적 변수를 고려하였다.

- 가혹 환경조건(예 : 고온 등) 및 신체활동이 많은 상태에서 하에서의 전자기장 노출의 영향.
- 허약하고 나이가 많은 사람, 유아와 어린이, 병자나 열 치료를 받는 사람과 같이 집단 내에서 잠재적으로 열적 감수성이 높은 사람들에 대한 영향.

고주파 전자기장에 대한 기준 레벨을 얻기 위해 다음과 같은 부가적인 요인들이 고려되었다.

- 신체 크기가 다르고, 노출 전자기장에 대해 다른 방향에 있는 사람들에 대한 전자기장 에너지 흡수의 차이.
- 고주파 에너지의 국부 흡수를 증가시킬 수 있는 입사 전자기장의 반사, 집속 및 산란현상.

이 기준을 만족한다고 해서 보철용 금속, 심장박동기, 세동제거기(defibrillators), 인공 내이(人工 內耳, cochlear implants)와 같은 의료장비와의 간섭 및 이들 장비에 대한

영향을 배제할 수 있는 것은 아니다. 심장 박동기와의 간섭은 권고된 기준 레벨 아래에서도 일어날 수 있으며, 관련 문헌을 참고할 수 있다^[2].

이 기준은 시변(時變) 전기장, 자기장, 전자기장의 건강 유해 영향이 새로이 밝혀지는 대로 정기적으로 개정될 것이다.

II. 용어 및 단위

2-1 용어

공진	전파(電波)의 주파수가 물질의 고유 주파수에 일치하거나 근접하는 주파수일 때 나타나는 전자기파 진폭의 변화로서 인체의 신장을 L(m)이라 할 때 전자기파의 전진속도는 주파수가 약 $114/L(\text{MHz})$ 일 때 최고치, 즉 공진을 일으킴.
근거리장	복사 안테나로부터의 거리가 복사되는 EMF의 파장보다 짧은 영역으로서 공간의 고유 임피던스를 곱한 자기장 강도와 전기장 강도가 서로 다르며, 안테나가 이 거리에 비해 매우 작고 안테나로부터 파장의 1/10 이하의 거리에서 전자기장 강도는 거리의 자승 혹은 삼승에 반비례함.
마이크로파	주파수 범위 300 MHz~300 GHz의 복사파 또는 전자기장으로서 송수신에서 도파관 및 공동(cavity) 기술에 사용되는 초단파 전자기 복사.
무선주파수(RF)	통신에 유용한 전자기장 복사 주파수로서, 이 기준에서 무선주파수라 함은 300 Hz~300 GHz를 말함.
비(非)열적 효과	열과 관련 없이 인체에 미치는 전자기적 에너지 효과.
비(非)전리성 복사	매질 내에서 전리를 일으킬만한 충분한 에너지를 갖지 않는 전자기 스펙트럼의 모든 복사 및 장(field, 場)을 가리키며, 광자(光子)당 에너지가 약 12 eV보다 작고 파장은 100 nm보다 크며 주파수는 3×10^{15} Hz보다 낮은 경우를 말함.(NIR)
전자파 흡수(SA)	생체조직에 흡수되는 단위질량 당 에너지(J kg^{-1})로서 전자파 흡수율(SAR)의 시간적분.
전자파 흡수율(SAR)	생체조직에 흡수되는 에너지 비율(W kg^{-1})로서 100 kHz 이상의 주파수에서 가장 널리 채택되는 노출 측정양.

원거리장	안테나로부터의 거리가 복사되는 EMF의 파장보다 먼 영역으로서 원거리장에서는 전자기장 성분(E와 H)과 전파(傳播) 방향이 서로 직각을 이루며, 복사 패턴의 형상이 복사원으로부터의 거리에 독립적임.
ELF(극저주파수)	300 Hz 이하의 주파수.
EMF	전기장, 자기장 및 전자기장.
일반인	일반적으로 노출되고 있는 사실을 모르거나 조치를 취할 수 없는 모든 연령과 다양한 건강 상태를 포함한 개개인.
일반인 노출	직업인 노출과 의료 목적의 노출을 제외한 일반 대중이 겪는 모든 EMF 노출.
자기장 강도	선형적이고 등방성 자기장 특성을 갖는 매질 내의 정현파적 시변장(時變場)에서 자속밀도를 매질의 투자율로 나눈 것(A m^{-1}).
자속밀도	운동하는 전하에 운동속도에 비례하는 힘을 유발하는 벡터량(T).
전기장 강도	전기장 내 한 점에 있는 정적 단위 양전하에 작용하는 힘(V m^{-1}).
전력밀도	무선 전파(傳播)에서 전파 방향에 수직인 단위 면적을 통과하는 전력(W m^{-2}).
전류밀도	이 벡터를 주어진 면적에 대하여 적분하면 그 면적을 통과하는 전류와 동일하며, 선형도체의 평균 전류밀도는 전류를 도체의 단면적으로 나눈 것과 같음.
조사량(照射量) 측정(법)	전자기장에 노출된 사람이나 동물 신체 내에 유도된 전류밀도 또는 내부 전기장 강도, 에너지 비(比)흡수 또는 에너지 비(比)흡수율 분포의 측정, 또는 계산에 의한 평가.
직업인	일반적으로 자신이 전자기장에 노출되고 있음을 알고 있으며 이의 잠재적인 위험성을 알고 적당히 주의하도록 훈련받은 성인.
직업인 노출	직업상 작업수행 과정에서 개인이 겪게 되는 모든 EMF 노출.

2-2 물리량과 단위

전기장이 전하의 존재에 의해서만 생성되는 반면에, 자기장은 전하의 물리적 운동(전류)에 의해 생성된다. 전기장 E 는 전하에 미치는 힘을 표현한 것이며 단위는 V m^{-1} 이다. 자기장도 전하에 대해 물리적 힘을 가하지만 전하가 운

동중일 때에 한해서만 가할 뿐이다. 전기장과 자기장은 크기와 방향을 갖는 벡터이다. 자속밀도 \mathbf{B} 의 단위는 T(Tesla)이며, 자기장 강도 \mathbf{H} 의 단위는 A m^{-1} 로 표현하고 다음과 같은 관계가 있다.

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

투자율(透磁率) μ 는 진공중 혹은 공기중에서 $\mu = 4\pi \times 10^{-7} (\text{H m}^{-1})$ 이며, 비자성(非磁性)물질(생물학적 물질을 포함한)에서도 동일한 값을 갖는다. 따라서 인체 보호를 목적으로 하는 자기장을 나타낼 때에는 \mathbf{B} 나 \mathbf{H} 중 하나로 표현하면 된다.

원거리장에서 평면파 모델은 전자기장 전파(傳播)를 적절히 근사한 것으로 평면파의 특성은 다음과 같다.

- 파면이 평면이다.
- \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 벡터들과 전파(傳播) 방향은 상호 수직이다.
- \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 의 위상은 동일하며, \mathbf{E}/\mathbf{H} 진폭 비는 공간 상에서 일정하다. 자유공간에서 \mathbf{E}/\mathbf{H} 의 진폭의 비는 $\mathbf{E}/\mathbf{H} = 377 \Omega$ 이며, 이는 자유공간에서 파동의 특성 임피던스이다.
- 전력밀도 S , 즉 전파(傳播) 방향에 수직인 단위 면적당 전력은 다음 표현에 의해 전기장 및 자기장과 연관된다.

$$S = \mathbf{E}\mathbf{H} = \mathbf{E}^2/377 = 377\mathbf{H}^2$$

근거리장에서는 원거리장에서와 같이 \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 의 최대와 최소가 전파(傳播) 방향에 따라 동일 지점에서 일어나지 않기 때문에 \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 의 상황이 훨씬 복잡하다. 근거리장에서는 전자기장 구성이 매우 비균일할 수 있으며, 평면파의 임피던스 377Ω 에 본질적 변화가 있을 수 있다. 즉 어떤 영역에서는 거의 순수하게 전기장만 존재할 수도 있고, 또 다른 영역에서는 거의 순수하게 자기장만 존재할 수도 있다. 따라서 근거리장에서는 \mathbf{E} 와 \mathbf{H} 가 함께 측정되어야 하고 전자기장 패턴이 복잡하므로 노출을 명확하게 표현하는 것이 어렵고, 이러한 상황에서는 전력밀도로 노출한계를 표현하는 것이 부적절하다.

시변(時變) EMF에 노출되면, 체내에 전류가 흐르거나 생체조직에 에너지 흡수가 일어나지만, 그것은 결합 메카니즘과 관련 주파수에 의존한다. 체내 전기장과 전류밀도는 다음과 같이 옴(Ohm)의 법칙에 관계된다.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

여기서 σ 는 매질의 도전율이며, 여러 가지 주파수 범위 및 파형을 고려하여 결정된 노출량은 다음과 같다.

- 10 MHz까지의 주파수 범위: 전류밀도 \mathbf{J}
- 110 MHz까지의 주파수 범위: 전류 I
- 100 kHz~10 GHz까지의 주파수 범위: 전자파 흡수율(SAR)
- 300 MHz~10 GHz까지의 주파수 범위에서 펄스 전자기장의 경우 : 전자파 흡수(SA)
- 10~300 GHz의 주파수 범위: 전력 밀도 S

이 기준에 사용된 EMF 및 노출 측정량의 기호 및 단위는 <표 1>과 같다.

<표 1> 전기장, 자기장, 전자기장 및 노출 측정량에 대한 SI 단위

양	기 호	단 위
도전율	σ	S m^{-1}
전류	I	A
전류밀도	\mathbf{J}	A m^{-2}
주파수	f	Hz
전기장 강도	\mathbf{E}	V m^{-1}
자기장 강도	\mathbf{H}	A m^{-1}
자속 밀도	\mathbf{B}	T
투자율	μ	H m^{-1}
유전율	ϵ	F m^{-1}
전력 밀도	S	W m^{-2}
전자파 흡수	S	J kg^{-1}
전자파 흡수율	SAR	W kg^{-1}

Ⅲ. 노출 제한의 근거

3-1 전자기장과 에너지 흡수

노출 제한을 위한 본 기준은 이미 발표된 과학적 문헌들에 대한 철저한 검토과정을 거쳐 제정된 것이다. 검토 과정의 기준은 다양하게 발표된 연구 결과들^{[3],[4]}의 신뢰성을 평가하는데 그 뜻을 두었으며 오직 검증된 영향들만을 노출

제한의 근거로 사용하였다. 장기간 노출로 인한 암의 유발은 명확하게 증명된 것으로 간주하지 않았으며, 따라서 이 기준은 말초 신경과 근육의 자극, 전도성 물체의 접촉에 의한 화상과 쇼크, 그리고 EMF 노출에 따른 에너지 흡수로 발생하는 생체 조직의 온도 상승과 같이 단기간 및 순간적인 건강영향에 기반을 두었다.

극저주파수 또는 진폭 변조된 극저주파수 전자기장의 단기간 노출에 관한 시험관 실험(*in-vitro*) 결과, EMF에 노출된 세포 및 생체 조직의 순간적인 반응들이 관찰되었으나 노출과 반응(*exposure-response*)의 관계가 명확하지 않다. 또한 이러한 연구 결과들의 많은 반응들이 생체 실험(*in-vivo*)에서 증명되지 못했기 때문에 시험관 실험 연구결과들만 가지고는 EMF 건강영향을 추정하는 기초 근거 자료로 이용하기는 어렵다.

시변(時變) 저주파 전기장과 인체와의 상호 작용은 전하의 흐름(전류), 구속 전하의 분극(전기 쌍극자), 체내에 존재하는 전기 쌍극자의 방향전환을 일으킨다. 이 영향의 정도는 신체의 전기적 특성 즉, 전기적 도전율(전류 흐름을 결정)과 유전율(분극 효과의 크기 결정)에 따라 다르다. 도전율과 유전율은 신체 조직의 종류에 따라 다르며 인가된 전기장의 주파수에 의해 결정된다. 외부의 전기장은 신체에 표면전하를 유도하여 체내에 유도전류를 생성시키는데, 유도 전류의 분포는 노출조건, 인체의 크기 및 형태, 전기장 내의 인체 위치에 따라 결정된다.

시변 저주파 자기장과 인체와의 물리적 상호작용은 전기장을 유도하고 전류를 생성시킨다. 유도된 전기장과 전류밀도의 크기는 루프의 반지름, 생체조직의 도전율, 자속밀도의 크기와 변화율에 따라 결정된다. 자기장의 크기와 주파수를 일정하게 하면 루프의 크기가 가장 클 때 최대의 전기장이 유도된다. 인체에 유도된 전류의 크기와 정확한 경로는 조직의 도전율에 의해 결정된다. 인체는 전기적으로 비균질한 매질이지만 해부학적, 전기적으로 실제에 가까운 인체 모델과 고도의 해부학적 분해능을 갖는 계산 방법을 이용하여 유도 전류밀도를 계산할 수 있다.

저주파 전기장 및 자기장 노출은 일반적으로 미세한 에너지 흡수와 측정이 어려울 정도의 신체 온도상승을 유발한다. 그러나 약 100 kHz 이상 주파수의 전자기장에 노출될 경우 상당량의 에너지 흡수와 온도상승을 일으킨다. 일반적으로 균일한 전자기장 평면파에 노출되는 경우에도 인체 내에는 매우 불균일한 에너지의 축적과 분포가 발생하므로, 이것을 노출량 측정 및 계산에 의해 평가해야 한다.

인체에 의한 에너지 흡수에 관해서 전자기장은 4가지 영역으로 나눌 수 있다^[6].

- 100 kHz~20 MHz : 주요 부분에 흡수될 경우 주파수의 감소에 따라 몸통에서의 흡수가 급격히 감소되며 목과 다리에 상당한 흡수가 일어날 수 있다.
- 20 MHz ~300 MHz : 신체 전체에 상대적으로 높은 흡수가 일어날 수 있으며, 특정부분(예를 들면 머리)의 공진 주파수를 고려한다면 더 높은 주파수까지 이 범위에 포함된다.
- 300 MHz ~10 GHz : 현저하게 국부적인, 불균일한 흡수가 일어날 수 있다.
- 10 GHz 이상 : 주로 인체 표면에 에너지 흡수가 일어난다.

생체조직의 SAR은 체내 전기장 강도의 제곱에 비례하며, 평균 SAR과 SAR 분포는 계산 또는 실험측정치로부터 추정된다. SAR 값은 다음과 같은 요인에 의해 결정된다.

- 입사 전자기장 매개변수인 주파수, 강도, 전기장의 편파 및 발생원과 대상물체의 상대적 배치(근거리장 또는 원거리장).
- 노출된 인체의 특성, 체격과 내부 및 외부의 기하학적 형태, 조직의 전기적 특성.
- 지면의 영향 및 노출된 인체 근처의 다른 물체의 반사 영향.

인체의 길이방향이 전기장 벡터와 평행을 이루며 평면파 노출상태(원거리장 노출) 하에 있을 때 전신 SAR은 최대 값에 이른다. 흡수되는 에너지의 크기는 노출된 인체의 크기를 포함하는 다수의 요소에 의해 결정된다. "표준 체형"^[6]이 접지되지 않은 경우 70 MHz에 근접하는 공진 주파수를 갖는다. 키가 큰 사람의 경우에는 공진 주파수가 좀 더 낮으며, 키가 작은 성인, 어린이, 유아 그리고 앉아있는 사람의 경우 공진 주파수는 100 MHz를 넘을 수도 있다. 전기장 기준레벨의 값은 인체흡수의 주파수 의존성을 근거로 한다. 접지된 사람의 공진 주파수는 1/2배로 된다^[2].

근거리장 노출은 흔히 높은 국부(머리, 허리, 발목) SAR을 발생시키며, 전신 SAR과 국부 SAR은 고주파 발생원과 인체 사이의 거리에 밀접한 관계가 있다^{[7]~[11]}. 궁극적으로 측정에 의해 얻어진 SAR 데이터가 수치모델 계산에 의해

얻어진 데이터와 일치하고 있다. 전신 평균 SAR과 국부 SAR은 다양한 노출 조건하에서 관찰된 영향을 비교하는데 편리하다. 10 GHz 이상의 주파수에서는 전자기장의 생체조직에의 침투 깊이가 작아 SAR은 흡수 에너지의 평가기준이 되지 못하고 전력밀도($W m^{-2}$)가 보다 적절한 노출측정량이다.

EMF에 의해 도전성 물체가 대전되면, 인체가 그 물체와 접촉할 때 인체를 통과하는 전류가 발생된다^{[21],[12]}. 이와 같은 전류의 크기와 공간 분포는 주파수, 물체의 크기, 인체의 크기 및 접촉면적에 의해 결정되며, 강한 전자기장에 노출된 인체와 도전성 물체가 근접하면 과도적 방전(불꽃)이 발생한다.

3-2 100 kHz 이하 주파수에 대한 노출 제한의 생물학적 근거

극저주파수부터 100 kHz까지 주파수 범위에서는, 생체조직에의 전류 유도가 상호작용의 주된 메카니즘이며, 이 절은 이 주파수 범위의 전기장 및 자기장의 생물학적 및 건강 영향에 관련된 문헌 검토를 요약하고 있다. 0에서 1 Hz까지의 주파수 범위에서는 기본적인 및 기준레벨의 생물학적 근거가 ICNIRP(1994)^[13]에 규정되어 있다.

유방 종양의 가능성을 제외하면 실험실의 연구에서는 전력 주파수 자기장이 종양을 촉진시킬 수 있다는 증거는 거의 없다. 세포 내 생성된 신호와 내분비선 조절은 암 시발된(initiated) 세포의 증식을 촉진(promoting)시켜 종양의 확산에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 극저주파수 자기장이 이들에 미칠 수 있는 영향을 분명히 할 필요가 있음에도 불구하고 현재로서는 이러한 자기장의 발암 영향에 대한 설득력 있는 증거가 없어 이러한 데이터는 노출기준 제정에 사용될 수 없다고 결론지었다.

시변(時變) 전기장에 노출되면 인체 표면에 교류 전하가 유도되어 모발의 진동이 일어나는 결과로 전기장이 감지된다. 몇 가지 연구에서 대부분의 사람들은 $20 kV m^{-1}$ 이상의 50/60 Hz의 전기장을 감지할 수 있으며, 일부의 사람들만이 $5 kV m^{-1}$ 이하의 전기장을 감지할 수 있음을 보고하였다^{[14],[15]}.

전기장 및 자기장의 생물학적 영향을 탐구하는 수많은 연구가 행하여졌지만, 생체 기능에 중대한 혼란이 일어나는 임계치가 되는 전기장, 자기장의 특성을 결정하는 체계적 연구는 거의 이루어지지 않았다. 유도 전류밀도가 임계치를 넘으면 신경 및 근육조직을 직접적으로 자극하는 사실은 충

분히 입증되었다^{[16],[17]}. 세포조직과 동물조직에 대한 실험연구에서 유도 전류밀도가 $10 m A m^{-2}$ 이하일 때에는 저주파 전자기장이 건강에 악영향을 미치는 뚜렷한 결과는 없는 것으로 밝혀졌다. 더 높은 유도전류밀도($10 \sim 100 m A m^{-2}$)에서는 신경계통의 기능변화와 같은 뚜렷한 조직 영향이 일관되게 관찰되었다^[17].

극저주파수 자기장 노출과 발암률 증가와의 관련 가능성이 중요한 논쟁으로 제기되고 있다. Wertheimer와 Leeper (1979)가 높은 전류 지역이라고 분류한 배전선과 주택 사이의 거리와 소아암 사망률과의 관계에 대해 보고한 이래 이 주제에 관한 몇 가지 보고서가 발표되었다. 발단이 된 이 연구의 기본 가설은 송전선과 같은 옥외 발생원이 주거 환경 50/60 Hz 자기장에 부가됨으로써 이것이 소아암 증가와 관련될 수 있다는 것이다.

최근의 연구에서는 극저주파수 전자기장의 인체영향에 대한 과거 연구의 미약한 연관성에 대하여 의문을 제기함에도 불구하고 전력선에 근접한 거주민들의 극저주파수 전자기장 노출과 암 발생률과의 연관성, 특히 어린이 사이에서 높은 백혈병 발병률이 있다는 미약한 상관관계가 대부분 일치된다. 그 연구들에서 소아암의 어떤 다른 유형이나 성인 암의 다른 유형의 발병률이 거의 비슷하게 증가한다는 것은 지적하지 않았다. 유아 백혈병과 전력선에 매우 밀접한 곳의 주거 환경 사이의 가설의 연계에 대한 근거는 알려지지 않았다. 백혈병에 대한 불명확한 발생 요인은 어떤 다른 이유에 의하여 전력선과 관련이 되어 있을지도 모른다. 그러나 실험실 연구에 의한 확인이 결여되어 있으므로, 역학적인 자료를 노출기준의 작성에 직접적으로 이용하는 것은 바람직하지 않다.

극저주파수 전자기장의 노출과 전기관련 직업 종사자의 발암률과의 관련 가능성을 조사하기 위해 수많은 역학연구가 수행되었는데 그 중 최초의 연구는 1982년 Milham에 의한 것으로, 직업 및 암 사망자 수에 관한 정보를 포함한 사망증명서 데이터 베이스를 이용하였다. 이와 같이 전기를 다루는 일에 종사하는 작업자들 사이에서 백혈병, 신경조직 종양, 제한된 범위의 유방암과 같은 특정한 암 종류의 증가된 발병률에 대한 보고서가 있었다^{[18]~[21]}. 전체적으로 이러한 연구들은 전자기장에 의하여 뇌종양이나 백혈병의 증가된 발병률을 제시했지만, 발병률이 증가된 암의 종류에 대해서는 거의 일치하지 않는다. 따라서 그 데이터는 극저주파수 전자기장에 관한 노출기준 제정에 이용하기에는 미흡하다.

임신영향에 대한 역학연구에서 시각적 디스플레이이 장치

(VDU)에서 작업하는 여성의 경우, 생식에 유해한 영향을 미친다는 일치된 증거는 없다고 규정되었다. 현재 입수 가능한 정보의 대부분은 VDU에의 직업상 노출과 생식에의 유해한 영향과의 관계를 발견할 수 없었다^{[17],[22]}.

실험실 연구와 자원자들에 대한 연구에서 생물학적인 반응을 측정된 결과, 일반적 노출 레벨의 저주파 전자기장은 거의 약영향을 미치지 못했다. 1 kHz까지의 주파수에서 10 mA m⁻² 임계 전류밀도는 신경계통기능에 거의 영향을 미치지 않는다고 밝혀졌다. 자원자중 노출에 대해 가장 일치하는 효과는 눈에 보이는 섬광의 출현과 극저주파수 전자기장에 노출 후 즉시, 또는 노출되는 동안 심장 박동률이 약간 감소하는 것이다. 그러나 이러한 순간적인 영향이 오랜 기간의 건강 위험과 관계가 있다는 증거는 전혀 없다. 멜라토닌 합성(melatonin synthesis)의 감소가 약한 극저주파수 전자기장과 자기장에 노출되는 몇몇 설치류에서 관찰되었지만 관리 조건하에서 극저주파수 전자기장에 노출된 인체에 대해서는 일치된 영향이 보고되지 않았다. 20 μT까지의 60 Hz 자기장 노출을 포함한 연구에서도 혈액 내 멜라토닌 레벨에 대한 믿을만한 영향이 보고되지 않았다.

전자기장의 간접적인 영향은 전자기장 내에서 다른 전위를 갖는 사람과 금속성 구조물과 같은 물체와의 물리적인 접촉(예를 들어, 건드리거나 스치는 것)의 결과로 발생할 수 있다. 그 접촉의 결과는 신체나 물체에 축적된 전하의 흐름(접촉 전류)이다. 약 100 kHz까지의 주파수 범위에서 전자기장 내에 있는 물체로부터 인체로 흐르는 전류는 근육이나 주위의 신경을 흥분시킨다. 100 kHz까지 전자기장이 여러 가지 간접적인 영향을 일으키는 임계전류는 <표 2>에 요약되어 있다^[2].

3-3 100 kHz 이상 주파수에 대한 노출 제한의 생물학적 근거

약 100 kHz에서 10 MHz까지의 주파수 대역에서 전자기장의 지배적인 영향은, 신경과 근육세포의 흥분으로부터 열 작용까지 걸쳐 있다. 그러나 10 MHz에서 300 GHz까지의 주파수 대역에서는 열작용이 지배적이며, 전자기 에너지의 흡수로 인해 체온이 상승하고, 1~2°C 이상의 온도상승은 건강에 나쁜 영향을 미칠 수 있다^[23].

지금까지 실험을 통해 밝혀진 사실은 휴식 상태의 인체가 전신평균 SAR이 1~4 Wkg⁻¹인 전자기장에 30분간 노출되었을 때 체온이 1°C 미만으로 증가한다는 것이다. 동물에 대한 실험 결과는 전술한 SAR 값이 행동양상의 변화에 대한 임계치임을 보여주고 있다. 4 Wkg⁻¹ 이상의 SAR 값을 발생시키는 강한 전자기장에 노출될 경우에는 신체의 체온 조절능력을 초과하는 열이 발생할 수 있기 때문에 해로운 정도로 조직이 가열될 수도 있다.

인간을 제외한 영장류 및 설치류를 대상으로 한 많은 실험실 연구를 통해 국부적이거나 전신에 대한 열작용으로 인해 온도가 1~2°C 이상 상승하면 다양한 형태의 조직 손상이 있을 수 있음을 확인하였다^[24]. 열손상에 대한 민감성은 조직에 따라 다르지만 눈이나 고환과 같은 가장 민감한 조직의 비가역적 열손상에 대한 임계치도 정상적인 환경조건하에서 4 W kg⁻¹ 보다 크다. 따라서 4 W kg⁻¹에 안전계수 10을 적용시킨 0.4 W kg⁻¹을 직업환경에 대한 기본한계치로 설정하였으며, 이러한 안전계수는 주변 온도, 습도 또는 물리적 활동수준이 정상적인 환경보다 상당히 높은 한계상황에 대해서도 충분한 여유를 제공한다.

실험실 연구 자료와 소수의 인체실험 결과들을 살펴보면 열 스트레스를 유발시킬 수 있을 정도의 극한적인 환경 및 약 또는 알코올의 사용은 인체의 체온조절능력을 저하시킬 수 있다^[24]. 이러한 조건하에 노출된 사람을 적절히 보호하기 위해서는 추가의 안전계수가 적용되어야 할 것이다.

감지할 수 있을 정도의 열을 발생시키는 강한 고주파 전

<표 2> 간접적 영향에 대한 임계전류 범위(어린이, 성인 남녀 포함)

간접 영향	임계전류 (mA)		
	50/60 Hz	1 kHz	100 kHz
접촉 인지	0.2 ~ 0.4	0.4 ~ 0.8	25 ~ 40
손가락 접촉에 의한 고통	0.9 ~ 1.8	1.6 ~ 3.3	33 ~ 35
고통스러운 쇼크 / 이탈불가(離脫不可, let-go) 임계치	8 ~ 16	12 ~ 24	112 ~ 224
심한 쇼크/호흡 곤란	12 ~ 23	21 ~ 41	160 ~ 320

자기장에 대한 인간의 반응에 관한 자료는 자원자에 대한 노출실험, 그리고 레이더, 마이크로파 치료장비, 마이크로파 가열장치 등과 같은 마이크로파 발생원에 노출된 노동자를 대상으로 한 역학연구로부터 얻어진 것이다. 이러한 연구 결과들은 세포 및 동물에 대한 실험실 연구로부터 도출된 1 °C 이상의 조직온도 상승이 생물학적으로 유해한 영향을 미칠 수 있다는 결론을 충분히 뒷받침하고 있다.

고주파 전자기장에 노출된 직업인과 일반인에 대한 역학 연구 결과는 전형적인 노출환경하에서 건강상의 위험이 없음을 보여주고 있다. 역학연구는 정확한 노출량의 평가 및 충분한 숫자의 모집단의 확보가 어렵다는 단점이 있음에도 불구하고 지금까지의 연구 결과는 전형적인 노출 레벨이 생식에 해로운 결과를 유발하거나 발암률을 증가시킨다는 납득할 만한 증거를 제시하지 못하고 있다. 이것은 미약한 고주파 전자기장이 비열(非熱)작용에 의해 기형(奇形) 발생물질이나 발암물질의 생성에 영향을 미치지 않는다는 세포 및 동물에 대한 실험실 연구 결과와 일치한다.

이미 발병한 종양세포의 확산에 대한 마이크로파 노출의 영향을 조사한 연구결과들도 발표되었으며, 강한 마이크로파에 노출된 쥐에서 이식된 폐육종세포의 성장률이 증가함을 관찰하였다^[25]. 이것은 마이크로파 노출에 의한 열 스트레스로 인해 면역체계가 약화될 수 있기 때문에 가능한 일이다. 열작용을 무시할 수 있는 수준의 약한 마이크로파 노출에 대한 최근의 연구에서 생쥐에 대한 흑색종의 확산 및 쥐에 대한 뇌신경교종의 확산에 마이크로파 노출이 어떠한 영향도 미치지 않는다는 사실이 확인되었다^{[26],[27]}.

생체조직에 축적되는 평균에너지가 같을 경우, 연속파보다는 펄스 변조된 전자기장이 생물학적 응답을 효과적으로 발생시킨다고 알려져 있으며^{[28],[29]}, 약 200 MHz에서 6.5 GHz 주파수 대역의 펄스 변조 전자기장이 소리로서 감지될 수 있다는 “마이크로파에 의한 환청” 효과가 보고되었다. “마이크로파에 의한 환청” 효과는 뇌의 청각피질의 열 탄성적 상호

작용에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 펄스폭 30 μs 미만의 펄스로 변조된 2.45 GHz 전자기장의 경우, 감지 임계치는 약 100~400 mJ m⁻² (4~16 mJ kg⁻¹의 조직 흡수에 상당)이다. 이러한 펄스 변조 마이크로파에 반복적 또는 장시간 노출되는 것은 유해할 가능성도 있다.

영장류에 한해서는 이러한 펄스 변조 마이크로파가 망막, 홍채 및 각막 내피 등에 영향을 줄 수 있다는 보고^{[20],[30]}가 있으며, 26 mJ kg⁻¹이라고 하는 낮은 흡수 에너지 레벨에서도 망막의 광감수성 세포의 변성이 발생하며, 녹내장 치료 약인 timolol maleate를 투여한 후, 펄스 변조 전자기장에 의한 망막손상의 임계치는 2.6 mJ kg⁻¹으로 낮아졌다고 한다. 그러나 펄스파가 아닌 연속파 전자기장에 대해서 실험한 다른 연구결과에서는 이러한 현상이 발생하지 않았다^[31].

진폭 변조 전자기장의 생물학적 영향에 관한 다수의 연구는 대부분이 낮은 노출레벨에서 수행되었으며 상반된 결과들이 나와 있다. 이들 연구를 상세히 분석하면, 진폭 변조 전자기장의 영향은 노출 파라미터, 노출대상인 세포 및 생체 조직의 종류, 그리고 어떤 생물학적 효과에 초점을 맞추느냐에 따라 다양한 결과가 도출된다는 것을 알 수 있다. 진폭 변조 전자기장의 비열적 영향에 관하여 보고된 연구결과와 타당성은 불확실하며 사람의 건강에 미치는 영향도 명확하지 않기 때문에, 이와 같은 정보를 전자기장에 대한 인간의 노출한계 설정의 근거로서 이용하는 것은 아직까지 무리가 있다고 생각된다.

전기충격 및 열손상은 전자기장 내에 존재하는 금속 물체와 사람과의 접촉 등에 관계하기 때문에, 고주파 전자기장의 간접적인 유해영향으로 볼 수 있다. 100 kHz에서 110 MHz(FM 방송파대의 상한)까지의 주파수 범위에 있어서 감지하는 정도나 통증을 유발하는 등의 영향을 발생시키는 접촉전류의 임계치는 주파수에 따라 크게 변화하지는 않는다.

접촉전류의 감지 임계치는 사람의 신체 크기에 따라 25

〈표 3〉 간접적 영향에 대한 임계전류 범위(어린이, 성인 남녀 포함)

간접적 영향	임계전류(mA)	
	100 kHz	1 MHz
접촉인지	25~ 40	25~40
손가락 접촉에 의한 고통	33~ 55	28~50
고통스러운 충격/이탈불가(離脫不可, let-go) 임계치	112~224	미결정
심한 쇼크/호흡 곤란	160~320	미결정

mA~40 mA의 범위에 있으며, 통증의 임계치는 약 30 mA~55 mA의 범위이지만, 50 mA를 넘으면 금속도체와의 접촉부위 생체 조직에 심각한 열손상을 입을 가능성이 있다고 보고되고 있다. 접촉전류에 대한 남성, 여성 및 어린이들의 감수성에는 큰 차이가 있으며, <표 3>에는 이들의 임계 전류 범위를 나타내었다.

도한 열발생을 막기 위해 기본한계를 SAR 값으로 규정한다. 특히, 100 kHz~10 MHz에서의 기본한계는 전류밀도와 SAR 양쪽 모두를 규정한다.

- 10 GHz ~ 300 GHz : 신체피부 및 그 주위조직에서의 열발생을 막기 위해 기본한계를 전력 밀도로 규정한다.

IV. 기본 한계와 기준 레벨

4-1 기본 한계

여러 주파수 범위에 대한 기본 노출한계를 설정하기 위해 주파수 범위에 따라 서로 다른 과학적인 근거를 사용하였다.

- 1 Hz~10 MHz : 신경계통 기능에 미치는 영향을 막기 위해 기본한계를 전류밀도로 규정한다.
- 100 kHz~10 GHz : 전신 열 스트레스와 국부조직의 과

유도하는 전자기장으로 제한한다. 일반인에 대해서는 부가적으로 5배의 안전계수를 더 적용하여 기본 노출한계를 2 mA m^{-2} 로 규정한다. 4 Hz 이하와 1 kHz 이상에서의 유도 전류밀도에 대한 기본한계는 이 주파수 범위에서의 신경 자극에 대한 임계치가 상승함에 따라 점차 증가한다.

수 Hz에서 1 kHz의 주파수 범위에서, 100 mA m^{-2} 이상의 유도 전류밀도 레벨은 중추신경계 흥분의 급격한 변화 또는 시각유발전위(視覺誘發電位)의 반전 등과 같은 급성영향의 임계치를 초과한다. 이러한 영향에 대한 안전성을 고려하여, 4 Hz ~ 1 kHz 주파수 범위에서 직업인 노출은 10

<표 4> 10 GHz 이하의 주파수에서 시변(時變) 전자기장의 기본한계

노출 특성	주파수 범위	머리와 몸통에서의 전류 밀도(mA m^{-2}) (rms)	전신평균 SAR (W kg^{-1})	머리와 몸통에서의 국부 SAR(W kg^{-1})	팔다리(四肢)에서의 국부 SAR(W kg^{-1})
직업인 노출	1 Hz 까지	40	-	-	-
	1~4 Hz	40/f	-	-	-
	4 Hz~1 kHz	10	-	-	-
	1~100 kHz	f/100	-	-	-
	100 kHz~10 MHz	f/100	0.4	10	20
	10 MHz~10 GHz	-	0.4	10	20
일반인 노출	1 Hz 까지	8	-	-	-
	1~4 Hz	8/f	-	-	-
	4 Hz~1 kHz	2	-	-	-
	1~100 kHz	f/500	-	-	-
	100 kHz~10 MHz	f/500	0.08	2	4
	10 MHz~10 GHz	-	0.08	2	4

주 :

1. 주파수 f의 단위는 Hz임.
2. 인체의 전기적 특성의 비균질성 때문에 전류밀도는 전류방향에 수직인 1 cm^2 단면적에 대하여 평균된 값임.
3. 100 kHz까지의 주파수에서 침투 전류밀도 값은 실효(rms)에 $\sqrt{2} \approx 1.414$ 를 곱하여 구해지며, 펄스폭 t_p 를 갖는 펄스파의 경우 기본한계를 적용하기 위한 등가주파수는 $f = 1/(2t_p)$ 로 계산함.
4. 100 kHz까지의 펄스형 자기장에 있어서, 이 펄스와 관련된 최대 전류밀도는 펄스의 상승/하강시간과 자속밀도의 최대 변화율로부터 계산될 수 있음. 이때 유도 전류밀도를 적절한 기본한계와 비교할 수 있음.
5. 모든 SAR 값은 임의의 6분간 평균된 값임.
6. 국부 SAR은 임의 10 g의 연속적인 조직에 대해 평균된 값이며, 이렇게 구해진 최대 SAR을 노출 평가에 사용하여야 함.
7. 펄스폭 t_p 를 갖는 펄스에 대해 기본한계를 적용하기 위한 등가주파수는 $f = 1/(2t_p)$ 로 계산함. 또한 0.3~10 GHz의 주파수에서 열단성 팽창에 의해 발생하는 청각효과를 막기 위해, 머리부분의 국부적인 펄스 노출 SA값은 직업인인 경우 10 mJ kg^{-1} , 일반인인 경우 2 mJ kg^{-1} 을 넘지 말아야 함.

배의 안전계수를 사용하여 10 m A m^{-2} 이하의 전류밀도를 10 MHz에서 수 GHz까지의 주파수 범위에서 확실하게 입증된 생물학적 영향 및 건강영향은 1°C 이상의 체온상승에 대한 반응과 밀접한 관계가 있다. 이러한 레벨의 체온상승은 일상적인 환경조건하에 있는 사람을 전신평균 SAR이 약 4 W kg^{-1} 인 전자기장에 약 30분 동안 노출시켰을 때 발생한다. 따라서 직업인 노출에 대한 적절한 보호를 위해서는 기본한계를 0.4 W kg^{-1} 전신평균 SAR로 설정한다. 일반인 노출에 대해서는 부가적으로 5배의 안전계수를 도입하여 0.08 W kg^{-1} 의 전신평균 SAR을 기본한계로 규정한다.

일반인 노출에 대한 기본한계를 더 낮게 정한 것은 일반인의 연령구성과 건강상태가 직업인과 다르다는 것을 고려한 것이다.

저주파수 범위에서, 과도(過渡)전류가 건강에 미치는 영향에 관한 데이터는 거의 없다. 따라서 과도현상이나 매우 짧은 시간의 침투 전자기장에 의해 유도된 전류밀도에 대한 기본한계는 시간평균이 아닌 순시값으로 고려해야 한다.

1 Hz~10 GHz 사이 주파수에 대한 전류밀도, 전신평균 SAR, 국부 SAR의 기본한계를 <표 4>에, 그리고 10 GHz~300 GHz의 주파수에 대한 전력밀도의 기본한계는 <표 5>에 나타내었다.

<표 5> 10 GHz~300 GHz 주파수에서 전력밀도의 기본한계

노출 특성	전력밀도 (W m^{-2})
직업인 노출	50
일반인 노출	10

주 : 1. 전력밀도는 주파수가 증가함에 따라 침투깊이가 점차 작아지는 것을 보상하기 위해 임의 노출면적 20 cm^2 와 임의 노출시간 $68/\text{f}^{1.05}$ 분 주기 상에서 평균된 값이어야 함(여기서 f의 단위는 GHz임).

2. 1 cm^2 에서 평균한 공간 최대 전력밀도는 위 표에 주어진 값의 20배를 넘지 않아야 함.

4-2 기준 레벨

수학적 모형과 특정 주파수에서의 실험연구 결과의 외삽에 의해 기본한계로부터 기준레벨이 구해진다. 기준레벨은 최상의 보호를 목적으로 전자기장에 노출된 개인에 대한 전자기장 결합이 최대가 되는 조건으로 규정된다. <표 6>과 <표 7>에는 직업인 노출과 일반인 노출에 대한 기준레벨이 각각 요약되어 있으며, [그림 1]과 [그림 2]에 그래프로 보였다. 기준레벨은 노출된 개인의 전신을 공간적으로 평균한

값이지만 노출에 대한 기본한계를 초과하지 않는다는 기본적인 단서를 갖고 있으므로 전자기장 노출 환경이 생물학적 영향에 직접적으로 근거하는 기본한계를 만족하면 이 절에서 규정하는 기준레벨을 초과해도 된다.

저주파 전자기장에 있어서 기본한계로부터 전자기장 강도의 기준레벨을 유도하기 위해 여러 가지 계산법과 측정법이 개발되었다. 이러한 계산법에 있어서 지금까지 사용되어 왔던 단순모형에서는 몸체의 비균질 분포, 전기 전도도의 이방성(異方性), 기타 중요한 생체조직의 계수가 고려되지 않았다.

주파수에 따른 전자기장의 생체영향과 결합특성 데이터를 모두 감안하여, 기준레벨의 주파수 특성을 고려하였다.

자기장 모형에서는 신체가 균질의 등방성 전도도를 갖는 것으로 가정하며, Faraday 법칙으로부터 유도된 다음 식을 사용한다. 간단한 원형 전도성 루프 모형을 적용하여 신체의 각 기관과 신체 부위(예 : 머리 등)에서의 유도전류 J 를 평가한다.

$$J = \pi R f \sigma B$$

여기서, R 은 유도전류의 루프 반경, f 는 주파수, σ 는 전기전도도, B 는 자속밀도이다. 더 복잡한 모형에서는 신체 피부의 유도전류밀도를 평가하기 위해 몸통부나 전신에 대한 타원체 모형을 사용하기도 한다.^{[32],[33]}

도전율이 0.2 S/m^{-1} 로 균일하다고 간단히 가정한다면 50 Hz에서 $100 \mu\text{T}$ 의 자속밀도는 신체주위 영역에 $0.2\sim 2 \text{ mA/m}^{-2}$ 의 전류밀도를 발생시킬 것이다.^[34] 또 다른 해석^[35]에 따르면 60 Hz에서 $100 \mu\text{T}$ 의 노출 레벨로 0.2 mA/m^{-2} 의 평균 전류밀도와 약 2 mA/m^{-2} 최대전류밀도가 발생된다. 해부학적으로 전기적으로 정교한 모형^[36]에 기초한 보다 실제적인 계산 결과, 60 Hz에서 $100 \mu\text{T}$ 에 대해 최대 전류밀도가 2 mA/m^{-2} 를 초과하는 것으로 나타났다. 정교한 모형에서는 생체세포의 존재로 인하여 유도전류와 전자기장의 공간분포 모양이 영향을 받으며, 단순화된 해석에 의한 것과 비교하여 유도전류의 진폭(2배 이상)과 전류가 흐르는 패턴 양쪽 모두에서 상당한 차이를 나타낸다.^[37]

전기장 모형에서 고려하여야 할 사항은 노출조건과 노출된 신체의 위치, 모양, 크기에 따라 표면전하밀도가 크게 변할 수 있으며, 이로 인해 신체 내부의 전류분포가 가변적이고 비균일하게 된다는 사실이다. 약 10 MHz 이하 주파수의 정현파 전기장에서 신체 내부 유도 전류밀도의 진폭은 주파수에 따라 증가한다. 유도 전류밀도 분포는 몸의 단면적에 반비례하여 변하며 목과 발목에서 비교적 클 수 있다. 최악

의 조건하에서 일반인 노출에 대한 5 kV/m^1 의 노출 레벨은 전기장의 방향이 몸의 축과 평행하다고 가정한다면, 몸통과 목에서 약 2 mA/m^2 의 유도전류밀도에 해당된다^{[34],[38]}. 그러나 5 kV/m^1 로 유도된 전류밀도는 실제적인 최악의 노출 조건하에서 기본한계를 만족할 것이다.

기본한계를 만족하는 것을 설명하기 위해 전기장과 자기장에 대한 기준레벨을 개별적으로 고려하여야 하며 함께 고려하여서는 안된다. 이것은 보호 목적에 있어서 전기장과 자기장에 의해 유도된 전류는 가산적이지 않기 때문이다.

100 kHz 주파수까지에서 대전(帶電) 도체와의 접촉에 의한 간접적 영향을 배제할 수 있는 상황에서는, 직업인의 전기장 기준레벨을 일반인의 기준 레벨의 두 배로 하는 것이 가능하다.

10 MHz 이상의 주파수에서 유도된 전기장과 자기장 강도는 계산 데이터와 실험 데이터를 사용한 전신 SAR 기본한계로부터 구해졌다. 최악의 경우 전자파 에너지 결합은 20 MHz와 수백 MHz 사이에서 최대값에 도달하며 이 주파수 범위에서 유도된 기준레벨은 전 주파수 대역 중 최소값을 갖는다. 유도된 자기장 강도는 전기장과 자기장 사이의 원거리장 관계($E/H = 377\text{ ohm}$)를 사용하여 전기장 강도로부터 계산되었다. 근거리장에서는 SAR의 주파수의존 곡선은 더 이상 타당하지 않으며, 또한 전기장과 자기장 성분의 영향은 분리하여 고려하여야 한다. 보수적으로 근사화하면, 전기장과 자기장 각각의 영향에 대한 에너지 결합은 SAR 한계를 초과할 수 없기 때문에 근거리장 평가에 노출레벨을 사용할 수 있다. 덜 보수적인 평가에 있어서는 전신평균 SAR와 국부 SAR에 대한 기본한계가 사용되어야 한다.

일반인 노출에 대한 기준레벨은 전 주파수 범위에서 직업인 노출에 대한 기준레벨에 여러 가지 계수를 사용함으로써 구해진 것이다. 이 계수들은 여러 주파수 범위에 따라 실제적이며 관련성 있는 영향에 근거하여 선정되었다. 일반적으로 이 계수들은 전체 주파수 범위의 기본한계를 따르며, 이 값들은 기본 한계량과 아래에 서술된 유도 기준레벨 사이의 수학적인 관계에 해당된다.

- 1 kHz 이하 : 전기장에 대한 일반인 기준레벨은 직업인 노출에 대한 값의 1/2 이다. 50 Hz에서 10 kV m^{-1} 또는 60 Hz에서 8.3 kV m^{-1} 인 직업인 노출값은 모든 가능한 조건하에서의 접촉전류로부터 자극효과를 막기 위해 충분한 안전성 여유치를 포함한다. 전자기장에 노출된 개인들의 90% 이상을, 간접적

용에 의한 위해로부터 보호하기 위해 이 값의 1/2 즉, 50 Hz서 5 kV m^{-1} 또는 60 Hz에서 4.2 kV m^{-1} 값이 일반인 기준레벨로 설정되었다.

- 1 kHz~100 kHz : 자기장에 대한 일반인 기준레벨은 직업인 노출값에 안전계수 5를 고려하여 설정되었다.
- 100 kHz~10 MHz : 자기장 강도 기준레벨은 전기장과 자기장의 원거리장 관련식을 사용하여 전기장 강도 기준 레벨로부터 계산되었다. 10 MHz 이하의 주파수에서 쇼크나 화상 또는 신체표면 전하 영향의 위험성을 근거로 하여 전기장에 대한 직업인 노출이 제한되지만 자기장은 이러한 위험에 그다지 영향을 미치지 않는다.
- 10 MHz~10 GHz : 전기장과 자기장에 대한 일반인 기준레벨은 직업인 노출에 대한 것보다 $\sqrt{5} \approx 2.2$ 배 낮다. 제공근은 '전자기장 강도'와 '전력밀도' 양의 관계에서 나온 것이다.
- 10 GHz~300 GHz : 기본한계에서와 같이 전력밀도에 의해 정의되며 일반인 기준레벨은 직업인 노출한계보다 5배 더 낮다.
- 펄스장(場)의 생체영향과 침투값 사이의 관계에 있어서 이용 가능한 정보가 거의 없지만, 10 MHz를 초과하는 주파수에서 펄스폭 상에서 평균된 평면파 평균전력밀도(Seq)는 기준레벨을 1,000배 이상 넘지 말아야 하거나, 전자기장 강도는 그림 1, 2나 표 6, 7에 주어진 전자기장 강도 기준레벨의 $\sqrt{1000} \approx 32$ 배를 넘지 말아야 한다. 약 0.3 GHz에서 수 GHz 사이의 주파수에서 이 한계치는 열 팽창에 의해 야기된 청각의 영향을 피하거나 제한함으로써 합리화될 수 있다. 이 주파수 범위에서 이러한 영향을 발생시키기 위한 30 μs 펄스에 대한 4~16 mJ kg^{-1} 의 SA 임계치는, 뇌에서 130~520 W kg^{-1} 의 SAR 침투치에 해당된다. 100 kHz~10 MHz 사이에서 [그림 1], [그림 2]의 전자기장 강도에 대한 침투치는 100 kHz에서는 1.5배 침투, 10 MHz에서는 32배 침투를 고려한 내삽법에 의해 구해진다.
- <표 6>, <표 7> 뿐만 아니라 [그림 1], [그림 2]에서 직업인 및 일반인 노출의 기준 레벨은 주파수 범위의 분할점에서 차이가 있다. 이것은 일반인 기준 레벨을 유도하기 위해 사용된 계수가 다르기 때문이며 한편 주파수에 따른 의존성은 직업인과 일반인 레벨 양쪽 모두에 대해 일반적으로 동일하게 유지된다.

〈표 6〉 시변(時變) 전기장과 자기장 (섭동되지 않은 rms 값) 에서의 직업인 노출 기준 레벨

주파수 범위	전기장강도(V m ⁻¹)	자기장강도(A m ⁻¹)	자속밀도(μT)	평면파 평균전력밀도 S _{eq} (W m ⁻²)
1 Hz 이하	-	1.63×10 ⁵	2×10 ⁵	-
1~8 Hz	20,000	1.63×10 ⁵ /f ²	2×10 ⁵ /f ²	-
8~25 Hz	20,000	2×10 ⁴ /f	2×10 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	-
10~400 MHz	61	0.16	0.2	10
400~2000 MHz	3 f ^{1/2}	0.008f ^{1/2}	0.01f ^{1/2}	f/40
2~300 GHz	137	0.36	0.45	50

주 :

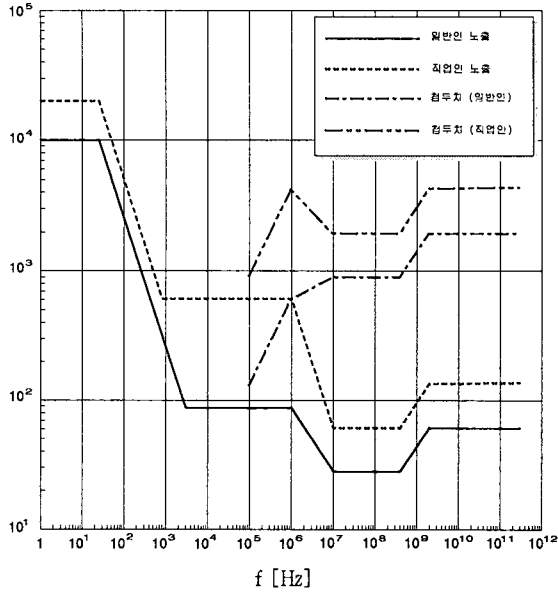
1. 주파수 f의 단위는 '주파수 범위' 란에 표시된 단위와 같음.
2. 기본한계를 만족하고 간접적인 위해를 배제할 수 있다면, 위의 전자기장 강도 값들을 초과할 수 있음.
3. 100 kHz~10 GHz 주파수 사이에서, S_{eq}, E², H², B²은 임의 6분 주기상에서 평균되어야 함.
4. 100 kHz까지 주파수에서의 침투값에 대해서는 〈표 4〉의 '주 3'을 참조.
5. 100 kHz 이상 주파수에서의 침투값에 대해서는 [그림 1]과 [그림 2]를 참조. 100 kHz~10 MHz에서의 침투값은 100 kHz에서 1.5배, 10 MHz에서 32배 가 되도록 내삽하여 계산함. 10 MHz 이상 주파수에서는, 필드폭에 해당하는 시간에 대해 평균한 등가평면파 전력밀도의 침투값이 S_{eq} 한계의 1,000배 를 초과하지 않도록, 또는 전자기장 강도가 표에 주어진 전자기장 강도레벨의 32배를 초과하지 않도록 제한됨. 0.3 GHz~수 GHz 사이의 주파수에서 는, 열팽창에 의해 야기되는 청각의 영향이 이 규제절차에 의해 제한됨.
6. 10 GHz 이상의 주파수에서, S_{eq}, E², H², B²은 임의 68/f^{1.05} 분 주기로 평균되어야 함. 여기서 f의 단위는 GHz임.
7. 1 Hz 미만의 주파수는 거의 정전기장이므로 어떤 전기장 값도 규정하지 않음. 低 임피던스 장비로부터 인체어 대한 전기충격은, 이 장비에 대한 별도의 전기안전절차에 의해 방지될 수 있음.

〈표 7〉 시변(時變) 전기장과 자기장(섭동되지 않은 rms 값)에서의 일반인 노출 기준 레벨

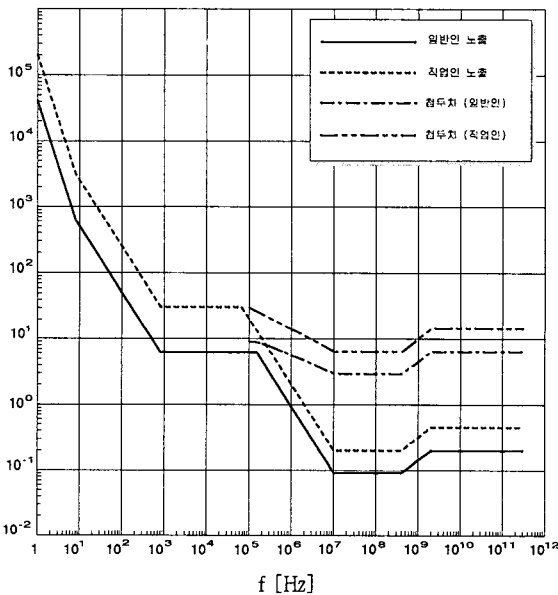
주파수 범위	전기장강도(V m ⁻¹)	자기장강도(A m ⁻¹)	자속밀도(μT)	평면파 평균전력밀도 S _{eq} (W m ⁻²)
1 Hz 이하	-	3.2 × 10 ⁴	4 × 10 ⁴	-
1~8 Hz	10,000	3.2 × 10 ⁴ /f ²	4 × 10 ⁴ /f ²	-
8~25 Hz	10,000	4000/f	5000/f	-
0.025~0.8 kHz	250/f	4/f	5/f	-
0.8~3 kHz	250/f	5	6.25	-
3~150 kHz	87	5	6.25	-
0.15~1 MHz	87	0.73/f	0.92/f	-
1~10 MHz	87/f ^{1/2}	0.73/f	0.92/f	-
10~400 MHz	28	0.073	0.092	2
400~2000 MHz	1.375 f ^{1/2}	0.0037f ^{1/2}	0.0046f ^{1/2}	f/200
2~300 GHz	61	0.16	0.20	10

주 :

1. 주파수 f의 단위는 '주파수 범위' 란에 표시된 단위와 같음.
2. 100 kHz~10 GHz 주파수 사이에서, S_{eq}, E², H², B²은 임의 6분 주기상에서 평균되어야 함.
3. 100 kHz까지 주파수에서의 침투값에 대해서는 〈표 4〉의 '주 3'을 참조.
4. 100 kHz 이상 주파수에서의 침투값에 대해서는 [그림 1]과 [그림 2]를 참조. 100 kHz~10 MHz에서의 침투값은 100 kHz에서 1.5배, 10 MHz에서 32배 가 되도록 내삽하여 계산함. 10 MHz 이상 주파수에서는, 필드폭에 해당하는 시간에 대해 평균한 등가평면파 전력밀도의 침투값이 S_{eq} 한계의 1,000 배를 초과하지 않도록, 또는 전자기장 강도가 표에 주어진 전자기장 강도레벨의 32배를 초과하지 않도록 제한됨. 0.3 GHz~수 GHz 사이의 주파수에 서는, 열팽창에 의해 야기되는 청각의 영향이 이 규제절차에 의해 제한됨.
5. 10 GHz 이상의 주파수에서, S_{eq}, E², H², B²은 임의 68/f^{1.05} 분 주기로 평균되어야 함. 여기서 f의 단위는 GHz 임.
6. 1 Hz 미만의 주파수는 거의 정전기장이므로 어떤 전기장 값도 규정하지 않음. 대부분의 일반인에게 있어서, 25 kV m⁻¹ 미만의 전기장 강도에서는 표 면전하에 대해 불쾌감을 느끼는 경우는 거의 없음. 스트레스나 불쾌감을 야기시키는 스파크 방전은 피하여야 함.



[그림 1] 시변 전기장의 노출 기준 레벨



[그림 2] 시변 자기장의 노출 기준 레벨

4-3 접촉전류와 유도전류에 대한 기준 레벨

이 절에서는 FM 라디오 송신주파수 대역을 포함한 110 MHz 까지에서 쇼크와 화상(火傷) 위험을 피하기 위해 주

의가 요해져야 하는 접촉전류에 관한 기준 레벨을 규정한다. 점접촉 기준레벨이 <표 8>에 나타나 있다. 어린이와 성인여성에서의 생체반응을 일으키는 점접촉전류 임계치는 성인남성에 비해 각각 약 1/2과 2/3이며, 일반인에 대한 점접촉전류 기준 레벨은 직업적 노출에 비해 1/2로 설정된다.

10~110 MHz 주파수 범위에서, 팔다리(四肢)에서 유도전류의 기준레벨은 국부 SAR 기본한계 이하로 규정한다(표 9 참조).

<표 8> 도체로부터의 시변(時變) 접촉전류에 대한 기준 레벨

노출 특성	주파수 범위	최대 접촉전류(mA)
직업인 노출	2.5 kHz 까지	1.0
	2.5~100 kHz	0.4 f
	100 kHz~110 MHz	40
일반인 노출	2.5 kHz 까지	0.5
	2.5~100 kHz	0.2 f
	100 kHz~110 MHz	20

주 : 주파수 f의 단위는 kHz 임.

<표 9> 10~110 MHz 주파수에서, 팔다리(四肢)에서의 유도전류에 대한 기준 레벨

노출 특성	전류 (mA)
직업인 노출	100
일반인 노출	45

주 : 1. 일반인 기준레벨은 직업인 기준레벨을 $\sqrt{5}$ 로 나눈 것과 같음.
2. 국부 SAR에서 기본한계를 만족하는지를 알기 위해서는 임의의 6분 주기에 대해 유도전류를 제공한 시간평균값의 평방근으로 기준레벨을 구함.

4-4 다중 주파수 전자기장에 대한 동시 노출

다중 주파수 전자기장에 동시에 노출될 경우의 영향은 열적 자극과 전기적 자극에 대한 영향으로 분리하여 평가하며, 실제 노출 상황에서 해당 주파수에 따라 아래 공식들을 적용한다.

10 MHz 주파수까지에 관련한 전기적 자극에 대한 유도전류밀도는 다음과 같이 합산하여야 한다.

$$\sum_{i=1}^{10\text{MHz}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1$$

100 kHz 이상의 열적 효과에 대해서는 SAR과 전력밀도값을 합산하여야 한다.

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{10\text{GHz}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10\text{GHz}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1$$

여기서 J_i 는 주파수 i 에서 유도되는 전류밀도,
 J_L , i 는 <표 4>에 주어진 주파수 i 에서의 유도 전류밀도 한계치,
 SAR_i 는 주파수 i 에서 노출에 의한 SAR,
 SAR_L 는 <표 4>에 주어진 SAR 한계치,
 S_L 는 <표 5>에 주어진 전력밀도 한계치,
 S_i 는 주파수 i 에서의 전력밀도.

기본한계의 실제 적용을 위해서는 전자기장 강도의 기준 레벨을 고려하여 다음 조건이 적용되어야 한다.

10 MHz 까지의 주파수에서, 유도전류밀도와 전기적 자극의 영향에 대해서는 다음 두 가지 요구사항을 전기장과 자기장 레벨에 적용하여야 한다.

$$\sum_{i=1\text{Hz}}^{1\text{MHz}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{MHz}} \frac{E_i}{a} \leq 1$$

그리고
$$\sum_{j=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\text{kHz}} \frac{H_j}{b} \leq 1$$

여기서 E_i 는 주파수 i 에서의 전기장 강도,
 $E_{L,i}$ 는 <표 6>과 <표 7>의 전기장 기준레벨,
 H_j 는 주파수 j 에서의 자기장 강도,
 $H_{L,j}$ 는 <표 6>과 <표 7>의 자기장 기준레벨,
 a 는 직업인 노출에 대해서는 610 V/m^{-1} ,
 일반인 노출에 대해서는 87 V/m^{-1} ,
 b 는 직업인 노출에 대해서는 24.4 A/m^{-1}
 ($30.7 \mu\text{T}$),
 일반인 노출에 대해서는 5 A/m^{-1} ($6.25 \mu\text{T}$).

이 합산공식은 유도전류밀도를 바탕으로 하기 때문에 열적 영향과는 구별하여야 하며, 상수 a 와 b 는 전기장에 대해서는 1 MHz 이상에서, 자기장에 대해서는 65 kHz 이상에서 각각 사용된다.

100 kHz 이상의 주파수에서 열적 영향을 고려하기 위해서는 다음의 두 가지 요구사항을 전기장과 자기장 레벨에 적용하여야 한다.

$$\sum_{i=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{c}\right)^2 + \sum_{i>1\text{MHz}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2 \leq 1$$

그리고

$$\sum_{j=100\text{kHz}}^{1\text{MHz}} \left(\frac{H_j}{d}\right)^2 + \sum_{j>1\text{MHz}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}}\right)^2 \leq 1$$

여기서 E_i 는 주파수 i 에서의 전기장 강도,
 $E_{L,i}$ 는 <표 6>과 <표 7>의 전기장 기준레벨,
 H_j 는 주파수 j 에서의 자기장 강도,
 $H_{L,j}$ 는 <표 6>과 <표 7>의 자기장 기준레벨,
 c 는 직업인 노출에 대해서는 $610/f \text{ V m}^{-1}$,
 일반인 노출에 대해서는 $87/f^{1/2} \text{ V m}^{-1}$,
 d 는 직업인 노출에 대해서는 $1.6/f \text{ A m}^{-1}$
 (f 는 MHz 단위),
 일반인 노출에 대해서는 $0.73/f$.

팔다리(四肢) 전류와 접촉전류에 대해서는 각각 다음의 요구사항을 적용한다.

$$\sum_{k=10\text{MHz}}^{110\text{MHz}} \frac{I_k}{I_{L,k}} \leq 1, \quad \sum_{n=1\text{Hz}}^{10\text{MHz}} \frac{I_n}{I_{C,n}} \leq 1 \quad \text{그리고}$$

$$\sum_{n=100\text{kHz}}^{110\text{MHz}} \left(\frac{I_n}{I_{C,n}}\right)^2 \leq 1$$

여기서 I_k 는 주파수 k 에서의 팔다리(四肢) 전류 성분,
 $I_{L,k}$ 는 <표 9>의 팔다리(四肢) 전류의 기준 레벨,
 I_n 은 주파수 n 에서의 접촉전류 성분,
 $I_{C,n}$ 은 <표 8>의 주파수 n 에서의 접촉전류의 기준 레벨.

이상의 합산공식은 다중 신호원으로부터 복사되는 전자기장 중에서 최악의 경우를 가정한 것이며, 따라서 실제 노출상황에서는 위 공식의 기준 레벨로 제시되는 것보다 덜 엄격한 노출 레벨을 요구할 수도 있다.

V. 보호방법

전자기장 노출량이 한계치를 초과할 경우 적절한 보호 조치가 필요하다. 전자기장으로부터 인체를 보호하기 위한 방법에는 공학적 및 관리적 제어와 개인적인 보호대책이 포함된다. 장치의 전자기장 방출을 한계치 이하로 줄일 수 있도록 공학적 제어가 이루어져야 하며, 접근을 통제하거나 시정각 경고장치를 사용하는 등의 관리적 제어가 사용되어야 한다. 보호복 같은 개인적인 보호방법은 어떤 환경에서는 유용하기는 하지만, 인체의 안전을 보장하기 위한 마지막 수단으로 고려되어야 하며, 가능한 한 공학적 및 관리적

제어가 우선되어야 한다.

인체의 전자기장 및 접촉전류에 대한 노출을 제어하기 위해 전자기장 발생원 측에서 전자기장을 감소하도록 전자기장 발생원을 변형하거나 접촉전류를 감소하도록 접촉 대상물체를 변형하는 방법이 있으며, 사람과 전자기장 발생원 사이에 보호막을 설치하거나, 높은 전자기장 지역으로의 접근 및 이러한 전자기장 내의 물체에 대한 접근을 제한하거나, 개인적인 보호장비를 제공하는 방법이 있다.

인체를 전자기장으로부터 보호하는 효과적인 방법은 전자기장 발생원측에서 보호대책을 실시하는 것이다. 전자기장 발생원에 의한 전자기장을 감소시키기 위하여 전자기장 발생원을 재설계하거나 재배치할 필요가 있으며 일반적으로 회로 내의 모든 도체들을 가능한 한 근접시키는 것이 유리하다.

누설 전자기장 등에 대해서는 전자기장 발생원 또는 전자기장 발생원을 포함하는 공간을 전자파 차폐재 등으로 덮어 차폐하거나, 금속판이나 전파 흡수체를 이용하여 전자기장 강도를 경감할 수 있다. 문제의 물체를 전기적으로 접지하거나 절연체를 씌움으로써 상당한 접촉전류를 제거할 수 있으며, 발목 유도전류에 대해서는 바닥면을 절연상태로 하는 등으로 인체의 비접지 조건을 확보한다.

또한, 전자기장 발생원과 인체 사이의 거리를 일정 이상 확보하고, 안테나의 지상위치를 높이는 등의 방법이 유효하며, 전자기장 발생원의 가동시간을 줄이거나, 간헐적 이용 설비의 경우 동작 시간율(duty cycle)을 작게 할 필요가 있다. 또한, 전자기장 발생원의 보수 등 특수한 상황에 대해서는 일시적으로 전자기장 발생원의 출력을 줄이거나 정지하는 방법이 있으며, 여러 전자기장 발생원이 국부적으로 집중하지 않도록 배치하고, 공중선의 복사가 특정방향을 향하지 않도록 하는 등의 방법을 고려할 수 있다.

그러나, 전자기장 발생원의 보수 등 특수한 상황에서는 전자기장 발생원측에서 대처하는 것보다 전자기장에 노출되는 인체측에서 보호대책을 세우는 것이 더 효과적일 수 있으며 이 경우에 개인 보호장비(보호복, 보호안경, 절연신발, 절연장갑)의 사용으로 전자기장 강도의 경감이 가능하다.

마지막으로, 안전관리 설명서 등에서 보호에 관하여 필요한 정보를 명시하고, 사용자가 이 정보에 기초하여 적절한 행동을 취하도록 할 필요가 있는데, 안전관리 설명서에는 장애발생의 가능성과 대피행동, 출입금지구역의 설정, 주의서 표시, 전자기장 발생원과의 적절한 거리확보, 금속물의 착용제한, 전자기장 강도 모니터 등의 이용, 측정·추정 등

에 의한 전자기장 강도의 사전확인, 심장박동장치 사용자 등의 특수한 상황 등에 관한 정보를 고려할 수 있다.

인체보호기준에 관한 전자기장 세기 측정 방법에 대해서는 별도로 제정한다.

참 고 문 헌

- [1] Repacholi, M. H. (ed), Low-level exposure to radio-frequency fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics*: 1998(in press).
- [2] 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.
- [3] Repacholi, M. H. and Stolwijk, J. A. J., Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Austral.*: 9(3), 79-84: 1991.
- [4] Repacholi, M. H. and Cardis, E., Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosimetry*: 1997 (in press).
- [5] Durney, C. H., Massoudi, H., Iskander, M. F., Radiofrequency radiation dosimetry handbook, Reg. No. SAM-TR-85-73. U.S. Air Force School of Aerospace, Medical Division, Brooks Air Force Base, Texas, 1985.
- [6] ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection, International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 66, Table B.6, p189, Oxford, Pergamon: 1994.
- [7] Kuster, N. and Balzano, Q., Energy absorption mechanisms by biological bodies in the near-field of dipole antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VT-42, 17-23; 1992.
- [8] Dimbylow, P. J. and Mann, S. M., SAR calculations in an anatomically realistic model of the head for mobile communication transceivers at 900 MHz and 1.8 GHz. *Phys. Med. Biol.*: 39, 1537-1553; 1994.
- [9] Jokela, K., Puranen, L. and Gandhi, O. P., Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas.

- Health Phys.*: 66(3), 237-244: 1994.
- [10] Gandhi, O. P., Some numerical methods for dosimetry: extremely low frequencies to microwave frequencies. *Radio Science*: 30(1), 161-177: 1995.
- [11] Tofani, S., d'Amore, G., Fiandino, G., Benedetto, A., Gandhi, O. P. and Chen, J. Y., Induced footcurrents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EC-37(1), 96: 1995.
- [12] Tenforde, T. S. and Kaune, W. T., Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.*: 53(6), 585-606: 1987.
- [13] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.*: 66(1), 100-106: 1994.
- [14] United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Extremely low frequency(ELF) fields. Geneva, *World Health Organization: Environmental Health Criteria* 35: 1984.
- [15] Tenforde, T. S., Biological interactions of extremely-low-frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.*: 25, 1-17: 1991.
- [16] United Nations Environment Programme/World Health Organization/International Radiation Protection Association. Magnetic fields. Geneva. *World Health Organization: Environmental Health Criteria* 69: 1987.
- [17] Tenforde, T. S., Interaction of ELF magnetic fields with living systems. In: Biological effects of electromagnetic fields, (Polk, C.: Postow, E., eds.). Boca Raton, FL, CRC Press: 185-230: 1996
- [18] Demers, P. A., Thomas, D. B., Sternhagen, A., Thompson, W. D., Curnen, M. G. M., Satariano, W., Austin, D. F., Issacson, P., Greenberg, R. S., Key, C., Kolonel, L. K. and West, D. W., Occupational exposure to electromagnetic fields and breast cancer in men. *Am. J. Epidemiol.*: 132, 775-776: 1991.
- [19] Matanoski, G. M., Breyse, P. N. and Elliott, E. A., Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet*: 337, 737: 1991.
- [20] Tynes, T., Andersen, A., Langmark, F., Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.*: 136(1), 81-88: 1992.
- [21] Loomis, D. P., Savitz, D. A. and Ananth, C. V., Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J. Nat. Cancer Inst.*: 86(12), 921-925: 1994.
- [22] National Radiological Protection Board. Health effects related to the use of visual display units. Report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK, *National Radiological Protection Board*: 1994a (NRPB Documents 5(2)).
- [23] American Conference of Government Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists: 1996.
- [24] Michaelson, S. M., Elson, E. C., Modulated fields and 'window' effects. In: Biological effects of electromagnetic fields (Polk, C.: Postow, E., eds.) Boca Raton, FL, CRC Press: 435-533: 1996.
- [25] Szmigielski, S., Szudinski, A., Pietraszek, A., Bielec, M., Wrembel, J. K., Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics*: 3, 179-191: 1982.
- [26] Santini, R., Hosni, M., Dechaux, P. and Packeco, F., B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. *Bioelectromagnetics*: 9(1), 105-107: 1988.
- [27] Salford, L. G., Brur, A. and Eberhardt, J. L., Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radio-frequency radiation. *Bioelectrochem. Bioenerg.*: 30, 313-318: 1993.
- [28] Frey, A. M. and Messenger, R., Human perception of illumination with pulsed ultra-high-frequency electromagnetic radiation. *Science*: 181, 356-358: 1973.
- [29] Lin, J. C., Microwave auditory effects and applications. Springfield, IL, Charles C. Thomas: 1978.
- [30] Kues, H. A., Hirst, L. W., Luttly, G. A., D'Anna, S.

-
- A.: Dunkelberger, G. R., Effects of 2.45 GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics*: 6, 177-188: 1985.
- [31] Kamimura, Y., Sato, K., Saiga, T. and Amemiya, Y., Effects of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Communications*, E77-B(6), 762-765, 1994.
- [32] Reilly, J. P., Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing*: 3, 101-109: 1989.
- [33] Reilly, J. P., Electrical stimulation and electropathology. Cambridge. Cambridge University Press: 1992.
- [34] Commission on Radiological Protection. Protection against low-frequency electric and magnetic fields in energy supply and use. Recommendation, approved on 16th/17th February 1995. In: Berichte der Strahlenschutzkommission, des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Heft 7. Stuttgart, Fischer: 1997.
- [35] National Academy of Science/National Research Council. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. Washington, DC, National Academy Press: 314: 1996.
- [36] Xi, W., Stuchly, M. A. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*: 9, 127-134: 1994.
- [37] Stuchly, M. A. and Xi, W., Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields. *Phys. Med. Biol.*: 39, 1319-1330: 1994.
- [38] International Labour Organisation. Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva, International Labour Office: 1994 (Occupational Safety and Health Series, no. 69).