

전자파의 인체위해 조사연구

김진석, 최익권
한국전자통신연구소 전파공학연구실

I. 머리말

전기·전자기기의 사용이 증가하면서 이들 기기에서 방사되는 전자파로 인한 장애가 심각한 문제로 대두되었다. 불요한 전자파는 다른 기기의 성능을 저하시키는 것은 물론 인체에 대한 장애의 가능성을 내포하고 있다. 최근 국내에서도 관심을 끌고 있는 전자파의 인체위해 가능성과 관련하여 논해 보기로 한다.

생체가 강한 전자파에 노출되는 경우 눈의 백내장 형성, 성기능 장애, 열적 손상, 경련, 행동 둔화 등의 생체작용이 일어나는 것으로 밝혀지고 있다. 그러나 일상생활 범위에서 각종 전파이용시설로부터 방사되는 전자파로 염려하는 바와 같은 생체작용이 일어나는 일은 거의 없을 것으로 생각된다.

현재 미국, 호주, 영국, 서독, 캐나다, 소련, 체코, 폴란드 등의 여러 기관, 조직이 전자파의 안전기준을 책정하고 있으나, 각 나라마다 다른 값으로 되어 있으며 크게 2 group으로 구별할 수 있다. 즉, 미국을 비롯한 서방 제국에서는 열적장애로 명확히 규정할 수 있는 현상을 해석하여 그 한계치를 안전기준으로 하고 있으나 소련 등 동구제국에서는 열적장애뿐 아니라 비교적 약한 전자파의 조사에 의하여 발생하는 생물학적 영향(비열작용)의 가능성도 고려한 기준을 설정하고 있다. 양자간의 안전기준은 그 차이가 축소하고 있는 경향이 있으나 전력밀도로 비교할 때 동구제국이 여전히 10~100배 정도 낮다.

II. 전자파가 생체에 미치는 영향

1. SAR과 에너지 흡수

전자계에 의한 생체작용은 표 1에 나타난 바와 같이 열작용, 자극작용 및 기타작용으로 구분된다.

이러한 생체작용 중에서 열작용 및 자극작용에 대해서는 많은 연구축적이 있으며 전계강도와와의 인과관계가 거의 정량적으로 파악되고 있는데 100kHz를 경계로 자극작용은 저주파수 영역에서 열작용은 고주파수 영역에서 지배적이다.

그러나 기타 작용에 대해서는 생체내의 현상과 분명한 관계로 확인된 것은 아니고 사람의 건강에 유해하다고 보이지도 않는다. 약한 전자파에 장기간 노출되었을 때의 영향은 명확하지 않으며 앞으로 더 연구해야 할 과제이다.

전자계에 의한 생체의 열작용은 조직내의열발생에

표 1. 전자파와 생체작용의 관계

작용의 구분	생체변화의 요인	작용의 평가량	전자파와의관계
열작용	전신 가열 열조절응답 심층부체온상승 열스트레스	전신평균SAR 상승온도 (심부체온)	거시적 상호작용 (선량학적 접근이 가능)
	국소 가열	국소평균SAR 상승온도 (국소조직온도)	
자극작용	전류자극에 의한 신경, 근육의 흥분	유도전류(밀도)	
기타작용	불명	전자계강도등 (변조주파수)	미시적 상호작용

의한 체온 혹은 조직온도의 상승이다. 이 온도상승은 조직의 흡수 에너지 양과 밀접한 관련이 있고 단위 질량조직이 단위 시간에 흡수하는 에너지의 양 즉 비흡수율(SAR)을 평가량으로 이용한다. 한편, 자극작용은 인체조직에 유도된 전류밀도와 관계되며 비흡수율 및 유도전류는 인체조직 내부의 전계강도와 조직의 도전율에 의존한다.

◦ SAR(Specific Absorption Rate) :

미소 체중 dm에 흡수되는 미소 에너지 dw의 시간 미분

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dm} \right) = \frac{1}{D} \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dv} \right)$$

SAR의 단위는 W/kg이며 조직에서의 SAR은 다음과 같이 표시된다.

$$SAR = \frac{C_t E_t^2}{D}$$

여기서 C_t = 복사주파수에서의 조직의 전기전도도 (mho/m)

E_t = 조직에서의 RMS 전계강도(V/m)

D = 조직의 밀도(kg/m³)

SAR은 내부전계강도의 제곱에 비례하며 평균 SAR은 내부전계강도의 제곱의 순시치를 평균한 값에 비례한다. 평균 SAR 과 SAR 분포는 계산될 수 있으며 실험적으로도 결정될 수 있는데 전신평균 SAR 은 열량측정법(calorimetry)으로, 평균 SAR

과 그 분포는 온도기록(thermography)으로, 국부 SAR 은 신체에 주입가능한 프로브로 실험한다. 첨두 SAR 은 국부 SAR 의 최대값이다. SAR은 다음의 변수로 주어진다.

- (a) 입사파의 주파수, 강도, 편파 및 전자파원과 물체의 배치
- (b) 조사된 생물체의 크기, 외부 및 내부의 기하 구조, 조직의 전기적 특성
- (c) 근처에 있는 다른 물체의 접지 및 반사 영향

신체의 긴 축(키 방향)이 전기장 벡터와 평행할 때 전자파 에너지의 전신흡수율은 최대에 이르며, 흡수되는 에너지의 양은 조사된(exposed) 사람의 크기 등 여러 요인에 의존한다. 접지되지 않은 경우 표준의 사람(키 1.74m)은 70kHz 근처의 주파수에서 에너지의 공진흡수를 가진다. 어린이나 유아들은 100kHz 이상에서 공진 에너지 흡수를 가지며 키가 큰 사람은 70kHz이하에서 공진흡수를 가진다.

그림 1은 70kg, 1.75m의 평균신체의 성인, 1.38m, 32.2kg의 10살 아이, 0.74m, 10kg의 1살아이, 0.4m, 3.5kg의 평균신체 유아의 여러 조건에서의 SAR곡선을 나타낸 것이다. 1mW/cm²의 전력밀도, E 방향의 최고 흡수 조건을 가정하였으며, 어른, 10살 아이, 1살 아이는 지면에 접촉하고 유아는 지면에 접촉하지 않은 것으로 가정하였다.

그림 1은 또한 여러 경우에 있어서의 최대 SAR을 나타내는 우산형 곡선 16을 보이고 있다. 흡수의 첨두치는 주파수 범위 30-300kHz에서 나타나며 일반적으로 SAR 은 저주파수에서 f²로 상승하고 높은 주파수 범위에서는 1/f로 감소한다. 그림 1은 1mW/cm²의 조사에서 30-300kHz에서의 최대 전신흡수평균 SAR은 0.42W/kg이하임을 나타내고 있다.

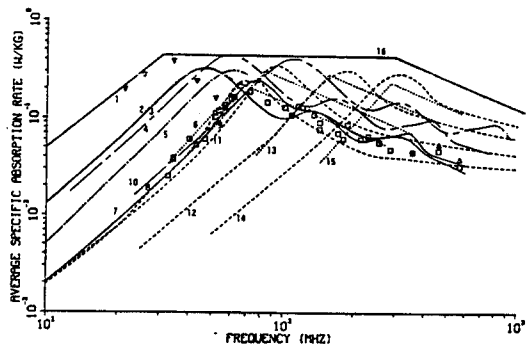


그림 1. 전신평균 SAR의 변화. 전력밀도=1mW/cm²

1. Experimental results scaled from saline-filled figurines under grounded conditions-adult human. 2. Numerical calculations with a block model of man-conductive contact with ground. 3. Empirical-adult human in conductive contact with ground. 4. Scaling of curve 2 for ten-year-old child(grounded contact). 5. Empirical-adult human 3cm from ground plane. 6. Empirical equation-adult human in free space. 7. Numerical calculations for a block model of man in free space with figurine experimental data shown by open squares and phantom experimental data shown by open triangles. 8. Prolate spheroidal model of man in free space. 9. Empirical equation-ten-year-old child. 10. Scaling of curve 2 for one-year-old child (grounded contact). 11. Prolate spheroidal model of ten-year-old child. 12. Prolate spheroidal model of a one-year-old child. 13. Empirical equation-one-year-old child. 14. Prolate spheroidal model of a human infant. 15. Empirical equation-human infant

2. RF/ MW(300kHz -300GHz)

다음은 RF/MW영역의 전자파가 생체에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

- (1) 주어진 전계강도에서 최대가열은 공진 주파수에서 일어나며 동물의 체중이 증가할수록 체온을 높이기 위한 SAR은 감소된다.
- (2) 30W/kg 이상의 전신평균 SAR에서 비교적 짧은 기간의 동물 조사는 치명적일 수 있으며 치명적인 SAR 값은 동물의 종과 조사 조건에 따라 다르다.
- (3) 높은 강도에서의 5분 이하의 짧은 전신 조사는 출생결함, 태아의 재흡수증가, 출생체중의 저하, 신생아의 생존저하 등의 심각한 생물학적 손상을 초래한다. 매우 높은 강도에서의 국부 조사는 화상을 초래할 수 있는데 예를 들면 원숭이의 안면 화상이 115W/kg에서 보고되었다.
- (4) 몇몇 동물의 눈에 높은 강도의 RF를 조사한 결과 백내장이 발생했다. 토끼의 눈에 100분 동안의 조사로 백내장을 일으키는 임계치는 150mW/cm²(침투 SAR 138W/kg)였다. 백내장의 가능성은 주파수에 따라 다른데 토끼의 경우 가장 유효한 주파수는 1-10GHz 범위이다. 저등 포유동물에서 백내장이 일어났던 것과 같은 조건에서 영장류에게는 백내장이 일어나지 않았는데 이는 영장류의 얼굴구조가 달라서 눈에 에너지가 흡수되는 양상이 다른 데 기인하는 것으로 보인다. 토끼의 전신에 42W/kg SAR의 원거리장 RF로 15분 동안 조사한 결과 보고가 있지만 낮은 강도로 장기간에 걸친 조사가 백내장을 일으

킨다고 결론지을 자료는 아직 없다.

- (5) 대부분의 동물실험에서 온도는 20-25℃, 습도는 50-70%이다. 그러나 열적으로 긴장된 상태, 즉 더 높은 온도와 더 높은 습도에서는 유사한 생물학적 영향이 낮은 SAR에서 일어난다. 22℃에서 2450MHz로 쥐를 조사한 결과 3W/kg에서 행동반응의 감퇴가 일어났지만 28℃에서는 1,2,3, W/kg에서 행동반응의 감퇴가 일어났다.
- (6) RF조사에 의한 분자 및 subcellular system에서의 일관된 생물학적 영향은 발견되지 않았다.
- (7) 단위 세포의 전기생리학적(electrophysiological) 특성, 특히 뉴런의 발화율은 1W/kg과 같은 낮은 SAR의 RF조사에서 일반적인 가열과는 다른 방식으로 영향을 받을 수 있다.
- (8) 일반적으로 RF조사된 동물에 있어서 상당한 온도상승없이 염색체, DNA 혹은 생식능력의 변화는 보고되지 않았다. 박테리아 실험에서 온도가 정상적인 생리적 범위보다 상당히 높지 않는 한 RF 조사는 돌연변이나 유전적 변화를 일으키지 않았다.
- (9) 0.5W/kg의 SAR에서 혈액 및 면역 시스템에 미치는 영향이 보고되었지만 열적인 관계없는 RF 조사의 영향에 대한 확증은 없다. RF 조사의 혈액 및 면역 시스템에 대한 영향은 일시적인 것으로 나타났다.
- (10) 15W/kg 이상 SAR에서의 RF 조사는 기형을 발생시킬 수 있는데 이 정도의 SAR은 임신한 동물에게 치명적일 수 있다. 산모 체온의 증가는 출산 결함으로 관련지워지며 산모 직장 온도가 41-42℃에 이르면 출산 결함이 나타난다.
- (11) 기형출산을 일으킬 정도나 치명적일 수 있는 정도보다 조금 낮은 SAR로 설치류 동물에 RF 조사할 경우 태아의 체중이 감소된다.
- (12) 동물의 고환에 45℃ 이상의 온도를 야기하는 RF 조사는 생식능력의 영구적인 변화와 깊은 관련이 있다. 37-42℃의 도에서 성숙한 정충은 정충상피(spermatogenic epithelium)의 일시적인 상실로 죽게 된다. SAR 5.6W/kg에서의 쥐에 대한 조사는 내부온도를 41℃ 올리며 일시적인 불임을 초래했다.
- (13) 동물의 중앙신경계(central nervous system)의 뉴런은 단기적인 고강도 혹은 장기적인 저

강도(2W/kg이상)의 조사에서 달라지는 것이 보고되었다. RF펄스 조사는 신경계 기능에 영향을 미치는 약과 상승작용을 할 수 있다.

- (14) 동물의 뇌전도에 기록된 주파수에 진폭변조된 RF전자파에 뇌조직이 조사되면 칼슘이온($^{45}\text{Ca}^{2+}$)유출이 증가된다. 이 반응은 조직내에서의 전계강도에 기인하는 것으로 보이며 가장 낮은 유효 SAR은 0.0013W/kg으로 산정된다. 칼슘 이온 유출은 AM 주파수 및 전계강도에 비선형적인 효과로서 특정 주파수 및 전계강도에서 최대를 나타낸다.
- (15) 쥐에 있어서 운전행동(locomotor behavior)의 변화는 1.2W/kg의 SAR에서 일어나고 다람쥐 원숭이의 온도조절 반응(thermoregulatory behavior)는 1W/kg의 SAR에서 일어난다. 다른 학습행동 반응의 감퇴는 쥐의 경우 2.5W/kg, 벵골원숭이의 경우 5.0W/kg에서 일어났다. 보고된 행동변화는 시간이 지남에 따라 가역적이다.
- (16) 내분비선의 기능과 혈액에 있어서의 변화는 열적 긴장의 증가에서 일어난 변화와 유사하며 일반적으로 1W/kg이상의 SAR에서 일어난다. 전신 가열을 일으킬만한 충분한 강도의 조사는 다른 원인에 의한 가열에서와 유사하게 심장박동비의 증가를 일으킨다. 전신 신진대사의 변화는 10W/kg에서 일어났으며 마취된 동물의 뇌표면에 0.1W/kg으로 조사했을 때 뇌에너지 신진대사 변화가 일어났다.
- (17) 216-6500MHz의 RF펄스가 사람의 귀에 들릴 수 있는데 이러한 "RF hearing"은 펄스 폭과 펄스 반복율에 따라 다르며, 이 효과를 인간이 감지하기 위한 입사파의 임계치는 펄스 당 40microjoules/cm²이다. RF청각의 기구는 입사 펄스가 두개골 내에 미소하지만 빠른 thermoelastic 팽창을 야기하고 이는 압력파를 발생시켜서 뼈에 의하여 귀의 와우각(cochlear)으로 전달된다.
- (18) 0.5MHz-100GHz의 넓은 주파수 대역에서 피부의 열적인 감각이나 열적인 고통으로 유해한 RF 조사를 인지하기는 어렵다. 왜냐하면 대개의 에너지는 피부 아래에 침전되기 때문이다.
- (19) RF조사가 인간이나 동물의 수명을 단축시키거나 암을 유발하는 주된 원인이라는 확증은

없다. 그러나 수명이나 암유발을 목표로 수행한 연구는 거의 없고 수명단축이나 암에 관한 문제를 배제할만한 통계적인 자료가 부족하다. 2-3W/kg의 SAR 에서 생쥐에 대한 장기적인 조사는 3 가지 종양 형태의 암유발을 촉진한다는 보고가 있다.

- (20) 인체에 대한 데이터가 부족해서 장기간의 낮은 RF조사와 암을 포함한 사망률 혹은 질병률의 증가에 대한 명확한 관계를 나타내지 못하고 있다.
- (21) 중앙신경계, 혈액 및 면역 시스템, 그리고 행동은 RF조사에 가장 민감한 것으로 보인다. 특히 행동은 전체적인 조직 특히 신경 시스템이 어떻게 동작하고 있는가를 나타내기 때문에 유해한 동인에 대한 영향을 산정하는데 있어서 가장 민감한 기능으로 여겨진다. ANSI(American National Standards Institute)에 의하면 전신평균 SAR 4-8W/kg이 행동분열의 임계치와 관련되고 확증적인 유해효과는 SAR 4 W/kg 이상에서 일어난다. ANSI의 행동반응 감퇴에 관한 연구는 20-25℃에서 수행되었으나 EPA의 연구는 주변의 온도가 높을 때 이와 유사한 변화가 낮은 SAR 에서 일어남을 보여주고 있다. 예를 들면 22℃에서 유효한 SAR 은 3 W/kg 이고 28℃에서 유효한 SAR 은 1.2W/kg이었다.

3. 온도상승의 효과

가열(heating)은 대다수 RF 조사 효과를 이해하는데 가장 적절한 것으로서 RF조사에 의한 다른 가열원에 의한 신체온도의 증가에 대한 생물학적 효과를 조사하는 것은 중요하다. 사람의 평균온도는 37℃이고 대부분의 다른 포유동물은 36-38℃범위에 있다. 일반적으로 치명적인 온도는 평균온도보다 약 6℃이상이며 평균온도보다 5℃높은 온도(42℃)를 장기간 유지하면 일사병이나 뇌손상을 입게 된다. 남자의 경우 온도 상승은 수정능력의 감퇴를 야기하고 산모의 높은 체온 상승은 출산결함을 야기한다. 포유류 동물 고환의 정상적인 온도는 33-35℃인데 이것이 복부온도(37-38℃)에 이르면 불임이 일어날 수 있다. 젊고 건강한 남자에게 평균체온이 41℃가 되도록 하루 3시간씩, 40-60일 동안 조사한 결과 정충의 수는 60%감소했다. 또한 내부온도 41℃에서 전신평균

SAR 5.6W/kg으로 조사된 수컷 쥐의 일시적인 불임이 보고되었다. 따라서 비록 가역적이기는 하나 RF조사가 체온을 41℃까지 올리게 되면 수컷의 생식 능력에 유해한 효과가 일어난다고 결론지을 수 있다. 임신중인 설치류 동물에 6W/kg이상으로 단기간 조사하거나 4.8W/kg으로 장기간 조사할 경우 태아의 체중 감소가 일어난다. 여러 동물실험에서 일반적으로 내부온도를 0.5℃이하로 증가시키는 RF조사는 감지할만한 영향을 나타내지 않았다.

ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists)는 작업장에서 일하는 사람의 내부온도가 38℃를 초과하지 않도록 권고하고 있다. 따라서 내부온도를 1℃증가시키는 RF조사는 인체에 해롭다고 결론지을 수 있다. 수학적인 모델 분석에 의하면 주변온도 25-30℃에서 비교적 짧은 기간(1시간)동안의 전신평균 SAR 1-4W/kg은 인체에 1.0℃ 정도의 심각한 온도상승을 초래한다. 약 1W/kg의 SAR로 인체를 조사하면 어떤 환경에서는 공진주파수 대역에서 상당한 체온변화가 일어나게 되는데 다 음과 같은 3 가지 부가적인 문제가 고려되어야 한다.

첫째, 체온의 측정가능한 증가는 신체가 긴장상태에 있음을 의미한다. 신체의 내부온도를 증기시킬 수 있는 SAR 이하의 RF 조사에서도 내부온도를 정상적인 범위로 하기 위하여 열소모 조절기구다 활성화될 수 있다.

둘째, 내부온도가 정상적이더라도 신체의 일부는 국부적인 RF 에너지 흡수로 온도상승을 일으킬 수 있다. 수학적인 모델로부터의 계산에 의하면 전신평균 SAR 1.4 W/kg으로 내부온도가 0.5℃상승할 때 허벅다리에서는 3.6℃의 온도 상승을 보인다.

셋째, 개인에 따라서 특별히 열에 민감한 집단이 있다. 요약하면, 동물실험으로부터 내부온도를 1℃올리는 RF조사는 유해한 영향을 초래하고, 동물실험(특히 영장류)과 인체의 열적 모델로부터의 결과는 그러한 내부온도 증가를 야기하는 SAR은 종의 차이와 주위환경에 따라 1-4W/kg에 있음을 보여준다.

4. 전력선 주파수(50/ 60Hz)

가. 결합기구(Coupling Mechanisms)

전력선 주파수 전자기장의 결합 기구는 다음과 같다. ·50/60Hz전기장은 조사된 신체에 표면전하를 유기하고 이는 몸안쪽으로 전류를 초래하며 전류의

크기는 표면전하밀도와 관련이 있다. 조사조건, 조사되는 신체의 크기, 모양, 위치에 따라서 표면전하밀도는 크게 변할 수 있으며 가변적이고 불균일한 전류 분포를 초래한다.

·50/60Hz전원으로부터의 자기장은 전기장과 전류를 유기함으로써 인체에 영향을 미친다.

·50/60Hz전기장에 조사된 도전성 물체(예를 들면, 자동차)에 유기된 전하는 그 물체에 접촉함으로써 인체를 통하여 흐르는 전류를 야기할 수 있다.

·도체(예를 들면, 담장)와 결합된 자기장은 그 물체와 접촉함으로써 인체를 통하여 흐르는 전류를 야기한다.

·사람과 강한 전기장에 조사된 금속 물체가 충분히 가까이 있으면 순간적인 방전이 일어날 수 있다.

·50/60Hz의 전기장 및 자기장은 몸안에 주입된 의료기기(예를 들면, cardiac pacemaker : 전기적 자극으로 심장의 박동을 계속시키는 장치)와 작용할 수 있으며 기기의 오동작을 유발할 수 있다.

나. 동물실험과 인체에 대한 관계

신체표면의 최대 전계강도를 고려하면 돼지에 대한 유효전계강도 25kV/m의 조사는 인체의 경우 9.3kV/m에 해당하고 신체표면의 평균전계강도를 고려하면 13kV/m에 해당한다. Kaune과 forsythe는 인간, 돼지, 쥐를 비교하기 위한 근사값을 유도했는데⁽¹²⁾, 60Hz의 전기장은 같은 비교란(unperturbed) 전계강도에서 인간의 경우가 돼지보다 7.3배의 전류 밀도를 초래하고 쥐보다 12.5배의 전류밀도를 초래한다. 100kV/m의 쥐에 대한 조사는 약 8kV/m의 인간에 대한 조사에 해당하고 100kV/m의 돼지에 대한 조사는 13.7kV/m범위에서의 장기간의 인체에 대한 조사는 명백한 건강유해를 야기하지는 않는 것으로 예측할 수 있다.⁽⁹⁾

서로 다른 조건에서 조사된 동물들에 있어서 혈액화확변화에 대한 데이터는 일관된 어떤 생리학적 변화를 보이지 못했으며 장(filed)의 지각에 필요한 강도 이상에서의 동물의 행동실험은 조사의 영향을 시사하였다. 대부분의 행동실험은 전계강도 10kV/m이하에서는 아무 영향을 보이지 않았으며 행동에 대한 영향은 3mA/m²의 전류밀도를 유기하는 전기장 조사에서 보고되었다. 실험동물(설치류)에 대한 연구는 성장과 발육에 대한 심각한 영향을 보이지 않았다. 낮은 강도의 50/60Hz장에서의 인체에 대한 장기간 조사는 앞으

로 더 연구해야 할 과제이다.

다. 전기장의 영향

50%의 사람들은 머리털이나 신체와 옷사이의 들먹거림으로 50/60Hz, 20kV/m의 전기장강도를 감지할 수 있다. 실험실 조건에서 일부 사람들은 2혹은 3kV/m의 전기장강도를 감지할 수 있다.

50/60Hz전자기장 조사와 암발생의 관련은 아직 확립되지 않았고 가정으로 남아 있으며 IRPA(International Radiation Protection Association)도 이 결론에 동의한다. 현재로서는 50/60Hz의 장기적인 낮은 강도의 조사는 암의 위험을 증가한다고 볼 수 없다. 실험 데이터와 인체의 연구로부터 50/60Hz에서 20kV/m강도에서의 단기조사로는 건강에 해로운 영향이 없다고 결론지워졌다.⁽¹⁶⁾

충전된 물체와의 접촉으로 흐르는 50/60Hz의 정상(steady-state)전류는 단지 감지할만한 영향으로부터 심실 근육성 진동(ventricular fibrillation) 및 사망에 이르는 영향까지 초래한다. 충전된 물체와의 접촉에서 오는 전기적 쇼크의 정도는 의존한다. 10mA를 초과하는 전류는 "let-go"임계치(let-go 임계치는 그 강도를 초과할 때 자극이 지속하는 한 근육수축으로 인해 도체를 놓을 수 없는 전류강도이다.)가 초과될 수 있기 때문에 심각한 위험이 되며 불수의근 수축으로 인해 충전된 물체를 놓을 수 없게 된다.⁽¹¹⁾ 산정된 let-go 전류강도는 작은 어린이의 경우 어른의 1/2이다. 전류가 let-go강도를 초과하면 심실 근육성 진동이 일어날 수 있다.

차량으로부터의 50/60Hz 정상접촉전류에 의한 전형적인 임계치는 다음과 같다.⁽¹⁸⁾

10-12kV/m: 어린이의 고통 감지(승용차, 손가락 접촉)

8-10kV/m: 어린이의 고통스러운 쇼크(트럭, 손가락 접촉)

4-5kV/m: 어른의 접촉 감지(승용차, 손가락 접촉)

2-2.5kV/m: 어린이의 접촉 감지(승용차, 손가락 접촉)

air gap을 통한 spark로 사람과 충전된 물체 사이에 순간적인 정전(capacitative)방전이 일어날 수 있다. spark방전에 의한 순간적인 전기적 충격에 대한 반응은 방전전압과 방전하는 물체의 정전용량에 의존한다.

순간적인 방전에 대한 개인의 민감도는 신체 체중과 선형적인 관계가 있다. spark 방전에 조사된 성인에 대한 데이터는 피실험자의 50%가 2.7kV/m에서 spark 방전으로 성가심을 느낀다는 점을 보이고 있다.

라. 자기장의 영향

전기전도도(conductivity)0.2S/m인 조직에 반경 10cm의 loop을 가정하면 조직체 내의 유해한 전류밀도를 산출하는 자속밀도를 계산할 수 있다. 다음은 유기된 전류밀도와 50/60Hz field에서의 전진조사에 의한 생물학적 영향을 나타낸것이다.⁽¹⁷⁾

1-10mA/m²(자속밀도 0.5-5mT): 미세한 생물학적 영향이 보고되었다.

10-100mA/m²(5-50mT): 시각 및 신경계의 영향을 포함한 잘 입증된 영향이 있다.

100-1000mA/m²(50-500mT): 흥분성(excitable)조직의 자극이 관측되며 건강 유해의 가능성이 있다.

1000mA/m²초과(50/60Hz, 500mT초과): 심장수축과 심실 근육성 진동이 일어날 수 있다.(심각한 건강 위험)

자속밀도 5mT까지(전기장도 20kV/m까지와 같이)로 매일 4-6시간씩 지원자에 대해 여러 날 시험한 결과 어떤 중요한 영향이 나타나지 않았다. 따라서 단기간의 직업상의 조사는 5mT(10mA/m²의 전류밀도를 유기)를 초과해서는 안되며 극단적인 경우 25mT를 초과해서는 안된다. 후자는 사지에사의 loop 직경을 고려한 것인데 이는 몸통 직경의 약1/5이다. 자기장에 대한 장기조사 자료 부족하기 때문에 직업상의 연속조사에 대한 자속밀도는 0.5mT로 제한한다. 일반대중에 대한 연속조사의 제한치는 직업상의 연속조사에 대하여 5의 안전계수를 적용하여 0.1mT로 놓고 단기조사 조사의 제한치는 1mT에 놓는다.

전형적인 사무실과 가정의 평균치는 0.01-1μT이다.⁽¹⁰⁾ electric/oil heater로 난방되는 방에서는 때로 12μT까지 발생되며 여러 기구로부터 30cm거리에서는 최고 1-30μT의 침투치가 발생한다. 전력선으로부터의 자속밀도는 다소 높아서 약 10-30μT까지 이를 수 있다.⁽⁸⁾ 그러나 전기담요, 모발건조기, 면도기 같은 지구 가까이에서는 (3.0cm)자속밀도가 0.1-1mT에 이를 수 있다.

Ⅲ. 전자파에 대한 인체보호기준

1. 각국의 동향

현재 미국, 일본, 독일, 영국, 캐나다, 호주, 소련, 체코, 폴란드, 중국, IRPA등 여러 기관, 조직이 전자파의 안전기준을 책정하고 있으나 각 나라마다 다른 값으로 되어 있으며, 이러한 기준들이 법적규제기준으로 정해진 나라는 없고 강제성을 가지지 않는 표준(standard) 혹은 안전기준(safety guideline)으로 사용되고 있다. 미국을 비롯하여 일본, IRPA등 서방제국에서는 열적장해로 명확히 규정할 수 있는 생물학적 영향을 해석하여 그 한계치를 안전기준으로 하고 있으나, 소련등 동구제국에 있어서는 열적장해뿐 아니라 비교적 약한 전자파의 조사에 의하여 발생하는 생물학적 영향(비역작용)의 가능성도 고려한 기준을 설정하고 있어서 서방제국의 기준보다 낮은 값으로 되어 있다. RF가 아닌 초저주파(0-300Hz)에 관한 기준은 IRPA, 독일을 제외하고는 대부분의 나라에서 마련되어 있지 않은 상태이다. 각국의 최근 동향은 다음과 같다.

미국에서는 ANSI가 1966년 직업상의 전자파 조사에 관한 표준을 발표하고 1982, 1990년에 이를 개정했다. 개정된 표준은 관리(controlled)환경과 비관리(uncontrolled)환경으로 구분하여 적용된다. ANSI 표준은 기술적으로 뒷받침된 표준으로서 높이가 평가되고 있으며 각국의 기준에 큰 영향을 미치고 있다.

일본에서는 전기통신기술심의회에서 전자파에 의한 생체작용의 학술적 근거, 외국에 있어서의 안전기준에 대한 고려사항, 전자계의 평가방법 등에 대하여 조사·심의하여 1990년 전파보호지침을 작성하였다. 일본의 전파보호지침은 ANSI가 권고하고 있는 안전기준과 거의 같은 내용으로 되어있다.

한편, 국제적인 기준으로서 IRPA는 1984년 RF조사에 대한 중간지침을 발표하고 1987년 이를 개정했다. IRPA의 권고치는 ANSI표준과 비슷하지만 일반대중에 대한 조사에 있어서 5 배 더 엄격하다.

오스트레일리아 표준협회(Standards Association of Australia : SAA)는 1985년 RF표준을 개발했는데 그 권고치는 국제적인 것에 유사하다. 그러나 이 표준은 400MHz 이상의 주파수대에서 더 엄격한데 직업상의 조사치는 IRPA가 50W/m²인데 비하여 10W/m²이다. 대중에 대한 조사치는 IRPA와 마찬가지로 직업상의 조사치는 1/5이다.

독일은 1984년 조사치의 주파수 범위가 10kHz-300GHz 인 표준의 개정에 착수했는데 제안된 값은 IRPA값보다 높으며 직업상의 조사치와 대중에 대한 조사치가 같은 값으로 권고되었다.

영국에서는 최근에 NRPB(National Radiological Protection Board)에서 300GHz이하에서의 전자파에 대한 조사를 제한하는 기준을 공식화했는데 이는 NRPB 1982, 1986, IRPA 1988에 대한 반응을 고려한 것이다. 이 기준은 열적 효과, 전기적인 쇼크 및 화상으로부터 인체를 보호하기 위하여 SAR과 유도전류를 제한하는 것으로 구성되어 있다.

1987년에 발표된 캐나다 기준은 10kHz-300GHz주파수 범위의 전계 및 자계강도와 전기적인 쇼크 및 화상을 방지하기 위하여 접촉전류를 규정하고 있는데, 일반대중에 대한 조사 제한치가 직업상의 조사 제한치보다 낮게 되어 있다.

개발된 여러 기준들은 4W/kg이 넘는 전신평균 SAR은 행동효과(behavioral effects)를 야기한다는 ANSI의 산정기준에 크게 근거하고 있으며 동유럽의 조사치는 국제적인 권고치에 접근하는 경향을 보이고 있다.

2. 안전계수

ANSI는 전신에 평균 4W/kg이하의 SAR을 일으키는 1시간 이하의 조사는 실험 동물의 건강에 유해한 영향을 미치지 않는다고 결론지었다. 그러나 장기적인 조사는 손상을 초래할 수 있으므로 허용SAR은 10배 감소된 0.4W/kg으로 했다. 조사 제한치에는 과학적인 자료의 부족과 조사할 때의 가능한 모든 조건을 고려하여 안전계수(safety factor)가 도입되어야 하는데 안전계수에는 다음과 같은 변수들이 고려되어야 한다.

- (1) 여러 크기에 인체에 의한 전자파 흡수, 특히 신체의 전신 혹은 부분 공진에너지 흡수
- (2) 첨두(peak)SAR과 생물학적 영향의 관계에 대한 지식이 부족
- (3) 환경조건 : 조사 제한치는 온도, 습도 및 공기이동의 나쁜 조건에서 인체를 보호할 수 있어야 한다.
- (4) 흡수를 증가하게 할 수 있는 입사파의 반사, focusing 및 산란
- (5) 약을 사용할 때 가능한 반응 변화
- (6) RF 전자파 에너지와 화학적인 약품과의 공동

작용

(7) 변조된 M/W의 중앙신경계에 대한 영향의 가능성과 그러한 영향에 있어서의 “전력” 및 “주파수” 창(window)의 존재 가능성

(8) 비열적 영향의 가능성

현재로서는 (5), (6), (7) 및 (8)에 관한 데이터는 건강위험을 산정하거나 잠재적으로 건강에 대한 영향을 미치는지의 여부를 결정하기에는 부족하다.

인체보호기준에서의 안전계수는 안전을 보장하는 것이라기보다는 미지와 불확실성을 보상하려는 시도로 보아야 할 것이다. 안전계수는 일반적으로 10-1000의 범위에 있으며 대체로 100 정도가 많이 사용된다.

◦ 조사(exposure)대상의 구분

직업상으로 조사되는 집단은 통제된 조건에 있는 성인으로 구성되어 있으며 잠재적인 위험을 알고 있고 적절한 주의를 취하고 있다. 직업상의 조사시간은 일하는 시간에 한정되어 있다.

일반대중은 나이와 건강상태가 다른 사람들로 구성되어 있다. 신체에 따라서 공진 주파수 범위가 다르며 신체 여러 부분에서의 RF 에너지 흡수분포도 다르다. 일반대중에는 전자파에 특별히 민감한 사람도 포함되며 조사가 일어나고 있음을 모를 수도 있고 하루 중 24시간 동안 그리고 일생동안 조사될 수도 있다. 또한 일반대중은 RF 화상과 충격에 대하여 아무런 주의를 취하지 못할 것으로 예상될 수 있다. 이와 같은 이유로 해서 직업상의 조사 제한치보다 일반대중에 대한 조사 제한치를 낮게 채택하는 것이다.

3. IRPA 기준

IRPA는 1987년 RF에 대한 인체보호기준을 발표하고, 1989년에는 전력선 주파수(50/60Hz)에 대한 잠정기준을 발표했다.

가. 50/ 60Hz

기본적인 기준은 50/60Hz전기장 및 자기장에 연속적으로 조사될 경우 머리와 몸통에 유기되는 전류밀도를 10mA/m²로 제한하는 것이다.

1). 직업인(Occupational)

◦ 전기장

작업시간 중의 연속적인 조사의 경우 비고란(unper-

turbed)전계강도는 10kV/m를 초과해서는 안된다. 단기간의 직업상의 조사는 rms 전계강도(kV/m)와 조사시간(hours)를 곱한 것이 전체 작업시간 동안 80을 넘지 않으면 rms전계강도 10-30kV/m가 허용된다.

◦ 자기장

작업시간 중의 연속적인 조사는 경우 rms자속밀도는 0.5mT를 초과해서는 안된다. 단기간의 직업상의 전신조사는 작업시간 중 2 시간까지는 자속밀도가 5mT를 초과해서는 안되며 사지에 제한될 때는 25mT까지 허용가능하다.

2). 일반대중(General public)

◦ 전기장

일반대중에 대한 연속적인 조사는 rms전계강도 5kV/m를 초과해서는 안된다. 이 제한은 일반 대중이 낮에 실제로 시간을 보내는 휴식공간, 회합장소와 같은 개방된 공간에 적용되며 하루 중 수 시간 동안에는 5-10kV/m의 조사로 제한된다. 필요하다면 하루 중 수분 동안 10kV/m를 초과하는 전기장의 조사가 허용될 수 있지만 이 경우 유기된 전류밀도는 2mA/m를 초과하지 말아야 하고 간접결합의 영향에 대한 주의가 취해져야 한다.

◦ 자기장

일반대중에 대한 연속적인 조사는 rms자속밀도 0.1mT를 초과해서는 안된다. 이 제한은 일반대중이 낮에 실제로 시간을 보내는 지역에 적용된다. 자속밀도 0.1-1.0mT에서의 조사가 하루 중 수 시간 동안 허용되며 필요하다면 1mT를 초과하는 자속밀도에서의 조사가 수분 동안 허용된다.

50/60Hz전기장 및 자기장에서의 직업인 및 일반대중에 대한 조사제한치가 표 2에 요약되어 있다.

표 2. 50/60Hz조사 제한치

조사특성	전계강도 kV/m(rms)	자속밀도 mT(rms)
직업인		
Whole working day	10	0.5
Short term	30 ^a	5 ^b
For limbs	-	25
일반대중		
Up to 24 h/d	5	0.1
Few hours per day	10	1

a 10-30kV/m에서의 조사시간은 공식 $t < 80/E$ 로부터 계산될 수 있는데 여기서 t는 조사시간(hour), E는 전계강도(kV/m)이다.

b 최대 조사시간은 2 시간이다.

나. RF(100kHz-300GHz)

1) 직업인(Occupational)

10MHz에서의 직업상의 조사는 전계 및 자계강도의 값이 하루 중 어느 6분 동안 평균될 때 표 3에 주어진 rms값을 초과해서는 안되며 몸에서 지면으로 흐르는 전류가 200mA를 초과해서는 안된다. 펄스의 경우 펄스 폭 동안 평균한 전계 및 자계강도의 제한치는 표 3에 주어진 값의 32배이다. 10MHz이상의 주파수대에서 직업상의 조사는 어느 6분 동안 전신을 평균할 때 SAR이 0.4W/kg을 초과해서는 안되며 손, 손목, 발, 발목에서는 0.1kg당 2W, 그외 다른 부분에서는 0.1kg당 1W를 초과해서는 안된다. 표 3의 10MHz-300 000MHz에서의 제한치는 SAR 0.4W/kg으로부터 유도된 것이다.

표 3. 직업인에 대한 조사 제한치

주파수 f(MHz)	rms전계강도 E(V/m)	H(A/m)	등가평면파 전력밀도 P _{eq} (W/m ²)	P _{eq} (mW/cm ²)
0.1-1	614	1.6/f	-	-
>1-10	614/f	1.6/f	-	-
>10-400	61	0.16	10	1
>400-2000	3f ^{1/2}	0.008f ^{1/2}	f/40	f/400
>2000-300000	137	0.36	50	5

2) 일반대중(General public)

10MHz이하에서의 일반 대중에 대한 RF조사는 표 4에 주어지는 rms전계 및 자계강도를 초과해서는 안된다. 10MHz이상의 주파수대에서 일반대중에 대한 조사는 전신에 대하여 6분 동안 평균할 때 SAR 0.08W/kg을 초과하지 말아야 한다. 10MHz-300 000MHz에서 표 4에 주어진 일반 대중에 대한 RF조사 제한치는 SAR 0.08W/kg에서 유도된 것이다. 이 제한치들은 하루 중 어느 6분 동안 평균된 연속 혹은 변조된 전자파로부터의 전신조사에 적용된다. 펄스의 경우

표 4. 일반대중에 대한 조사 제한치

주파수 f(MHz)	rms전계강도 E(V/m)	H(A/m)	등가평면파 전력밀도 P _{eq} (W/m ²)	P _{eq} (mW/cm ²)
0.1-1	87	0.23/f ^{1/2}	-	-
>1-10	87/f ^{1/2}	0.23/f ^{1/2}	-	-
>10-400	27.5	0.073	2	0.2
>400-2000	1.375f ^{1/2}	0.0037f ^{1/2}	f/200	f/200
>2000-300000	61	0.16	10	1

펄스 폭 동안 평균된 등가평면파 전력밀도는 Peq제한치의 1000배를 초과하지 않고 전계강도는 표 4에 주어진 전계강도의 32배를 초과하지 않도록 제한된다.

3) RF 쇼크와 화상

RF 쇼크와 화상은 전자파에 의하여 충전된 비접지 금속물체와 접촉함으로써 일어날 수 있다. 접촉점에서의 전류가 50mA를 초과하면 화상의 위험이 있다. 신체를 통하여 흐르는 전류는 물체의 크기에 의존하고 RF 전자기장과 지표에 대한 물체의 임피던스의 함수이다.

◦ 여러 전자파원으로부터의 조사

서로 다른 주파수에 동작하고 적어도 1개는 10MHz이상에서 동작하는 전자파원으로부터의 RF조사는 각 주파수에서 측정되어야 하고 전력밀도 혹은 전계 및 자계강도의 값을 표 3,4의 각 주파수대에서의 제한치의 비로 나타낸 다음 이들의 합이 1을 초과해서는 안된다. 모든 전자파원이 10MHz이하에서 동작하면 각 주파수에서 측정된 값을 전계 혹은 자계강도 제한치의 비로 나타내고 이들을 더한 값이 1을 넘지 말아야 한다.

◦ 예외 규정

citizen's band radio, 지상이동 및 해상이동 송신기, walkie-talkie같은 저전력 장비로부터의 RF 조사는 RF 출력이 7W이하일 경우 위의 제한치를 고려하지 않아도 된다.

4. ANSI 표준

ANSI(American National Standards Institute: 미국표준협회)는 1966년 직업상의 전자파 조사에 관한 표준을 발표하고 1982, 1990년에 이를 개정했다. 개정된 권고는 3MHz-300GHz의 전자파로부터 인체를 보호하기 위한 것이며 관리(controlled)환경과 비관리(uncontrolled)환경으로 구분하여 적용한다.

가. 최대허용조사(Maximum Permissible Exposure : MPE)

1) 관리환경

3MHz-300GHz의 전자파 에너지에 인체가 조사되는 경우 MPE는 rms전계 강도, 등가평면파 자유공간 전

력밀도 및 전자파에 조사되거나 전자파에 조사된 물체와 접촉함으로써 발생하는 유도전류의 향으로 표 5와 같이 주어진다. 고용조건으로 잠재적인 조사를 수용한 작업자에 대한 조사, 고용조건이 아닌 그 어떤 이유로 잠재적인 조사를 수용하거나 조사치가 표 6의 값을 초과하고 표 5의 값을 초과하지 않거나 유도전류가 표 6(b)의 값을 초과하고 표 5(a)의 값을 초과하지 않는 지역을 일시적으로 통과할 때의 조사를 수용하는 사람들에 대한 조사가 해당된다.

표 5. 관리환경에서의 최대허용조사

(a)-전자파*, f는 MHz단위

주파수범위 (MHz)	E (V/m)	H (A/m)	전력밀도 (mW/cm ²)	평균시간 H ² , E ² 혹은 S(분)
0.003-0.1	614	163		6
0.1-3.0	614	16.3/f		6
3-30	1842/f	16.3/f		6
30-100	61.4	16.3/f		6
100-300	61.4	0.163	1.0	6
300-3,000			f/300	6
3,000-15,000			10	6
15,000-300,000			10	616,000/f ^{1.2}

*전계 및 자계강도 향으로 나타낸 조사치는 인체가 점유하는 공간에서 평균된 값이다.

(b)-유도 및 접촉전류

주파수범위	최대전류(mA)		
	두발	한발	접촉
0.003-0.1MHz	2000f	1000f	1000f
0.1-100MHz	200	100	100

(a)rms RF 신체전류(어느 1 초 동안 평균)와 RF 쇼크 및 화상의 가능성을 다음과 같이 제한한다.

(1)금속물체와 접촉이 없는 경우

인체에 유도된 RF전류는 두 발을 통해 측정되었을 때 200mA이하이어야 하고 한 발을 통해서는 다음값 이하이어야 한다.

$$I=1000f\text{mA}(0.003 < f \leq 0.1\text{MHz})$$

$$I=100\text{mA}(0.1\text{MHz} < f < 100\text{MHz})$$

(2)금속물체와 접촉할 가능성이 있는 경우

잡는 접촉(grasping contact)에 대한 인체의 등가

임피던스를 통한 최대 RF 전류는 접촉전류계(contact current meter)로 측정할 때 다음을 초과해서는 안된다.

$$I=1000f\text{mA}(0.003 < f \leq 0.1\text{MHz})$$

$$I=100\text{mA}(0.1\text{MHz} < f < 100\text{MHz})$$

(b)최대허용조사는 인체가 점유하는 공간에서 평균된 조사치를 말한다. 국부조사의 경우 제한치는 완화될 수 있다. 비균일장의 경우 전계강도의 공간침투치는 평균치가 제한치 내에 있으면 제한치를 초과할 수 있다.

(c)300MHz미만의 주파수에서 근거리장에 조사될 경우 MPE는 전계 및 자계강도로 주어진다. 100MHz를 초과하는 주파수에서 MPE는 등가평면파 전력밀도로 표현될 수 있다.

(d)여러 주파수에서 혼합되어 있거나 광대역 장인 경우 각 주파수 대역에서의 MPE에 대한 비(E², H² 혹은 전력밀도의 향으로)가 결정되어야 하고 그들의 합이 1 을 초과해서는 안된다. 여러 주파수에서 혼합되어 있거나 광대역인 유도전류의 경우 각 주파수 대역에서의 유도전류 제한치에 대한 비(I²향으로)가 결정되어야 하고 그들의 합이 1 을 초과해서는 안된다.

(e)0.1-300,000MHz범위의 펄스에 조사되는 경우 인체에 유도된 specific absorption은 펄스당 30J/kg을 초과해서는 안된다. 연속되는 펄스에 조사되는 경우 specific absorption은 어느 6분 동안 평균될 때 144J/kg을 초과해서는 안된다.

(f)침투 전계강도 제한치는 100kV/m이다.

2)비관리 환경

주파수 3kHz-300GHz의 전자파에 인체가 조사되는 경우 MPE는 rms전계(E) 및 자계(H)강도, 등가평면파 자유공간전력밀도, 전자파에 조사되거나 전자파에 조사된 물체와 접촉함으로써 발생하는 유도전류의 향으로 표 6 과 같이 주어진다. 비관리환경에 관한 조사는 조사되고 있는 것을 모르거나 조사를 조절할 수 없는 사람들에 대한 조사이며 주거지역이나 혹은 조사치가 표 6 의 값을 초과하리라고 예상되지 않는 작업장에 해당된다.

(a)유도 RF 전류 현상에 익숙하지 않은 사람이 접근할 수 있는 비관리환경에서 RF화상의 가능성을 방지하고 유도전류를 사람들이 인지할 수 없는 값으로

표 6. 비관리환경에 대한 최대허용조사치

(a)-전자파*, f는 MHz단위

주파수범위 (MHz)	E (V/m)	H (A/m)	전력밀도 (mW/cm ²)	평균시간 (분)	
				H ²	E ² ,S
0.003-0.1	614	163	6	6	
0.1-1.7	614	16.3/f	6	6	
1.7-3.0	1300/f ^{0.413}	16.3/f	6	1.333f ^{2.83}	
3.0-30	823.8/f	16.3/f	6	30	
30-100	27.5	158.3/f ^{0.668}	0.0636 ^{1.337}	30	
100-300	27.5	0.0729	0.2	30	30
300-3,000			f/1500		30
3,000-15,000			f/1500		90,000/f
15,000-300,000			10		616,000/f ^{1.2}

*전계 및 자기장도 향으로 나타난 조사치는 인체가 점유하는 공간에서 평균된 값이다.

(b)-유도 및 접촉전류

주파수범위	최대전류(mA)		
	두발	한발	접촉
0.003-0.1MHz	900f	450f	450f
0.1-100MHz	90	45	45

제한하도록 주의가 취해져야 한다.

(1)금속물체와 접촉이 없는 경우

인체에 유도된 RF전류는 두 발을 통하여 측정될 때 90mA이하이어야 하고 한발을 통하여 측정될 때 다음을 초과해서는 안된다.

$$I=450f\text{mA}(0.003 < f \leq 0.1\text{MHz})$$

$$I=45\text{mA}(0.1\text{MHz} < f < 100\text{MHz})$$

(2)금속물체와 접촉할 가능성이 있는 경우

(a)잡는 접촉에 대한 인체의 등가임피던스를 통하여 흐르는 최대 RF전류는 접촉전류로 측정될 때 다음을 초과해서는 안된다.

$$I=450f\text{mA}(0.003 < f \leq 0.1\text{MHz})$$

$$I=45\text{mA}(0.1\text{MHz} < f < 100\text{MHz})$$

(b)최대허용조사치는 인체가 점유하는 공간에서 평균된 조사치를 말한다. 국부조사의 경우 제한치는 완화될 수 있다. 비균일장에서 공간침투치는 평균치가 제한치 내에 있으면 MPE를 상당히 초과할 수 있

다. 제한치는 SAR제한치와 대조하여 적절한 계산이나 측정으로 완화될 수 있다.

(c)300MHz미만의 주파수에서 근거리장에 조사될 경우 MPE는 표 6 에서와 같이 전계 및 자기장도(rms)의 향으로 주어지며, 등가평면파 전력밀도로 나타낼 수 있다.

(d)첨두전계강도 제한치는 100kV/m이다.

나. 예외규정

1)관리환경

100kHz-6GHz범위의 주파수에서 관리환경에서의 전자계강도에 대한 MPE는

(a)전신평균 SAR이 0.4W/kg미만이고 조직의 어느 1 gram에서 평균된 공간침투 SAR이 8W/kg을 초과하지 않으며, 예외로 손, 손목, 발, 발목은 조직의 어느 1cm²에서 평균된 공간침투 SAR이 20W/kg을 초과하지 않아야 한다.

(b)신체에 유도된 전류가 표 5 의 제한을 따르면 초과될 수 있다. 6GHz이상에서는 국부조사에서 MPE의 완화가 허용된다.

0.003-0.1MHz범위의 주파수에서는 위에서 언급된 SAR예외규정이 적용되지 않는다. 그러나 1 초 동안 조직의 어느 1cm²영역에서 평균된 침투 rms 전류밀도가 35f mA/cm²(f는 MHz단위의 주파수)를 초과하지 않으면 MPE는 여전히 초과될 수 있다.

2)비관리환경

100kHz-6GHz범위의 주파수에서 비관리환경에서의 전자계강도에 대한 MPE는

(a)전신평균 SAR이 0.08W/kg미만이고 조직의 어느 1 gram에서 평균된 공간침투 SAR이 1.6W/kg을 초과하지 않으며, 예외로 손, 손목, 발, 발목은 조직의 어느 1cm²에서 평균된 공간침투 SAR이 4W/kg을 초과하지 않아야 한다.

(b)신체에 유도된 전류가 표 6 의 제한을 따르면 초과될 수 있다. 6GHz이상에서는 국부조사에서 MPE의 완화가 허용된다.

0.003-0.1MHz범위의 주파수에서는 SAR예외규정이 적용되지 않는다. 그러나 1 초 동안 조직의 어느 1cm²영역에서 평균된 침투 rms 전류밀도가 17.5f mA/cm²(f는 MHz단위의 주파수)를 초과하지 않으면 MPE는 여전히 초과될 수 있다.

3)저전력 기기

100kHz-1.5GHz범위의 주파수에서 MPE는 복사기기의 RF입력전력이 7watt이하이면 초과될 수 있다. 예외는 신체에 부착되어 복사안테나가 지속적으로 접촉해 있는 기기에는 적용되지 않는다.

다. 국부조사에 대한 전력밀도 제한치의 완화

다음의 전력밀도 제한치의 완화는 눈과 고환을 제외한 신체의 모든 부분의 조사에 허용된다. 표 5,6의 MPE는 어떤 물체로부터 20cm이상 떨어진 인체와 등가인체적에서 공간평균된 전력밀도 혹은 전자계강도의 자승평균으로 결정된다. 관리환경의 경우 300MHz미만의 주파수에서 자승평균계강도의 침투치는 허용된 공간평균치(표 5)의 자승의 20배를 초과해서는 안되며, 300MHz-6GHz에서 등가전력밀도는 20mW/cm², 6-96GHz에서 등가전력밀도는 20(f/6)^{1/4}mW/cm²(f는 GHz단위), 96GHz를 초과하는 주파수에서 40mW/cm²를 초과해서는 안된다. 비관리환경의 경우 300MHz미만의 주파수에서 자승평균계강도의 침투치는 허용된 공간평균치(표 6)의 자승의 20배를 초과해서는 안되며, 등가전력밀도는 300MHz-6GHz에서 4mW/cm², 6GHz-30GHz에서 (f/1.5)mW/cm²(f는GHz단위), 30GHz를 초과하는 주파수에서 20mW/cm²를 초과해서는 안된다. 300MHz미만의 주파수에서 등가최대 rms계강도는 표에 나타난 허용공간평균치의 4.47배를 초과해서는 안된다. 표 7은 이를 요약한 것이다.

표 7. 국부조사에 대한 완화

	주파수(GHz)	평균자승계의 침투치	등가전력밀도(mW/cm ²)
관리환경	f < .3	<20E ⁻² 혹은 20H ⁻² *	<20
	.3 < f ≤ 6		<20(f/6) ^{1/4} ***
	6 < f ≤ 96		40
비관리환경	f < .3	<20E ⁻² 혹은 20H ⁻² **	
	.3 < f ≤ 6		4
	6 < f ≤ 30		f/1.5***
	f < 30		20

* E, H는 표 5의 공간평균치
 ** E, H는 표 6의 공간평균치
 *** f는 GHz단위

5. 일본의 보호지침

일본의 보호지침은 다음과 같이 구성된다.

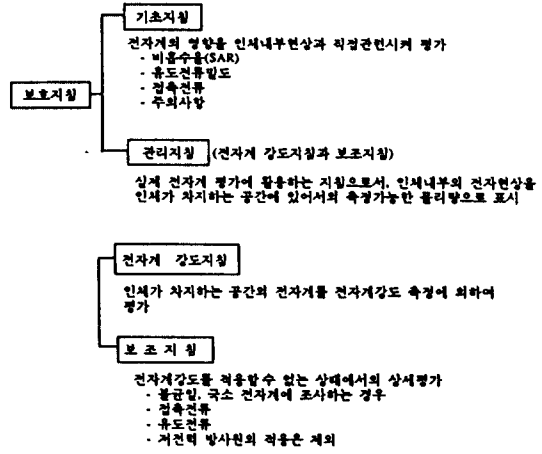


그림 2. 일본의 보호지침 구성

가. 관리지침

1)전자계강도지침

조건 P와 조건 G로 구분되는데, 조건 P는 전파이용의 실정이 인식되며 전자파 환경이 관리되고 있는 상황을 말하고, 조건 G는 보호지침 및 전파이용의 실정이 인식되고 있지 않은 상황(일반대중의 경우)을 말한다.

(1)조건 P

조건 P에 해당하는 경우의 전자계강도지침을 표8(a)와 표8(b)에 나타내었다. 측정대상공간이 국부적

표 8. (a)조건 P의 전자계 강도(평균시간 6분)지침치

주파수 f	전계강도의실효치 E[V/m]	자계강도의 실효치 H[A/m]	전력밀도 S[mW/cm ²]
10kHz-30kHz	614	163	
30kHz-3MHz	614	4.9f[MHz] ⁻¹ (163-1.63)	
3MHz-30MHz	1,842f[MHz] ⁻¹ (614-61.4)	4.9f[MHz] ⁻¹ (1.63-0.163)	
30MHz-300MHz	61.4	0.163	1
300MHz-1.5GHz	3.54f[MHz] ^{1/2} (61.4-137)	f[MHz] ^{1/2} /106 (0.163-0.365)	f[MHz]/300 (1-5)
1.5GHz-300GHz	137	0.365	5

(b)조건 P의 저주파영역에서의 전자계강도(평균시간<1초)지침치

주파수 f	전계강도의 실효치 E[V/m]	자계강도의 실효치 H[A/m]
10kHz-30kHz	2,000	163

으로 이 값을 만족하지 않을 경우에는 보조지침을 적용한다.

주 1: 접촉위험이 방지되어 있지 않은 경우의 전계강도 실효치는 15MHz이하에서는 137V/m이하(평균시간<1초)이어야 한다. 단, 이를 만족하지 않는 경우에 있어서 표8(a)와 표8(b)의 지침치 이하일 경우 보조지침(2)를 적용할 수 있다.

주 2: 인체가 비접지 조건을 만족하지 않는 경우 전계강도 실효치(평균시간 6분간)는 3MHz부터 30MHz에서는 $3,200f[\text{MHz}]^{-3/2}\text{V/m}$ (즉, 614V/m~20V/m), 30MHz부터 100MHz에서는 20V/m, 100MHz부터 300MHz에서는 $0.2f[\text{MHz}]\text{V/m}$ (즉, 20V/m~61.4V/m)이하이어야 한다. 단, 이를 만족하지 않는 경우에 있어서 표 8(a)의 지침치 이하일 때에는 보조지침(3)을 적용할 수 있다.

주 3: 표8(a)의 평균시간내에 있어서 전계강도 또는 자계강도가 변화하는 경우에는 평균시간내에서 실효치를 제곱평균평근한 값을 이용하고 전력밀도가 변화하는 경우에는 평균시간내에서의 평균치를 이용한다.

주 4: 전자계가 지침치에 대해 무시할 수 없는 레벨의 복수주파수 성분으로 되어 있는 경우에는 전계강도와 자계강도에 대해서는 각 주파수 성분의 지침치에 대한 비의 제곱을 구하고, 전력밀도에 대해서는 각 주파수 성분의 지침치에 대한 비를 구한뒤 이들의 합이 1을 넘지 말아야 한다.

(2)조건 G

조건 G에 해당하는 경우의 전자계강도지침을 표

9(a) 및 표 9(b)에 나타내었다. 측정대상공간이 국부적으로 이 값을 만족하지 않는 경우에는 보조지침을 적용한다.

표 9. (a)조건 P의 전자계 강도(평균시간 6분)지침치

주파수 f	전계강도의실효치 E[V/m]	자계강도의 실효치 H[A/m]	전력밀도 S[mW/cm ²]
10MHz-30MHz	275	72.8	
30MHz-3MHz	275	$2.18f[\text{MHz}]^{-1}$ (72.8-0.728)	
3MHz-30MHz	$842f[\text{MHz}]^{-1}$ (275-27.5)	$2.18f[\text{MHz}]^{-1}$ (0.728-0.0728)	
30MHz-300MHz	27.5	0.0728	0.2
300MHz-1.5GHz	$1.585f[\text{MHz}]^{1/2}$ (27.5-61.4)	$f[\text{MHz}]^{1/2}/237.8$ (0.0728-0.163)	$f[\text{MHz}]/1500$ (0.2-1)
1.5GHz-300GHz	61.4	0.163	1

(b)조건 P의 저주파영역에서의 전자계강도(평균시간<1초)지침치

주파수 f	전계강도의 실효치 E[V/m]	자계강도의 실효치 H[A/m]
10kHz-30kHz	894	72.8

2)보조지침

전자계강도지침만으로 보호지침을 만족하고 있다고 볼 수 없는 경우 인체가 전자파에 노출되는 상황, 고려해야 하는 생체작용등에 주목해서 보다 엄밀히 평가하기 위한 지침이다.

(1)인체가 전자계에 불균일 또는 국부적으로 노출

표 10.불균일 또는 국부적으로 노출되는 경우의 보조지침

	10kHz-300MHz	300MHz-1GHz	1GHz-3GHz	3GHz-300GHz
전자계강도의 공간평균치	조건P: 표 8의 전자계강도지침치 이하 조건G: 표 9의 전자계강도지침치 이하			
전자계강도의 공간최대치		팔, 다리 이외: 20mW/cm ²		피부: 조건 P: 50mW/cm ² 조건 G: 10mW/cm ²
			머리: 10mW/cm ²	눈: 10mW/cm ²
적용하는 공간	전파방사원, 금속 물체로부터 20cm 이상 떨어진 인체가 차지하는 공간	전파방사원, 금속물체로부터 10cm 이상 떨어진 인체가 차지하는 공간		
평균시간	6분			

되는 경우

주파수에 따라 해당되는 조건이 전부 만족되고 있는 경우 관리지침을 만족하는 것으로 간주한다. 인체로부터 20cm 이내 (300MHz 이상의 주파수에서는 10cm 이내)의 공간에서 사용하는 기기에 대해서는 그 상황마다 개별적인 판단이 필요하고 기초지침을 넘을 염려가 있는 경우에는 기초지침에 근거한 평가를 하는 것이 바람직하다.

(2)접촉전류

(a)조건 P에 있어서 접촉위험이 방지되어 있지 않은 경우

10kHz부터 100kHz의 주파수에서 측정된 접촉전류(평균시간<1초)가 $10^3 f[\text{Hz}] \text{mA}$ 이하, 100kHz부터 15MHz의 주파수에서 100mA이하이면, 표 8의 주 1을 만족하지 않아도 좋다. 단, 접촉전류가 이 지침치에 대해 무시할 수 없는 레벨의 복수주파수 성분으로 되어 있는 경우에는, 그 각 주파수 성분의 지침치에 대한 비의 제곱을 구하여 그 합이 1을 넘으면 안된다.

(b)조건 G에 있어서 접촉위험이 방지되어 있지 않은 경우

10kHz부터 100kHz의 주파수에서 측정된 접촉전류(평균시간<1초)가 $4.5 \times 10^4 f[\text{Hz}] \text{mA}$ 이하, 100kHz부터 15MHz의 주파수에 있어서 45mA이하이면, 표 9의 주 1을 만족하지 않아도 좋다. 단, 접촉전류가 이 지침치에 대해 무시할 수 없는 레벨의 복수주파수 성분으로 되어 있는 경우에는, 그 각 주파수 성분의 지침치에 대한 비의 제곱을 구하여 그 합이 1을 넘으면 안된다.

(3)유도전류

(a)조건 P에 있어서 비접지 조건을 만족하지 않는 경우

300MHz부터 300MHz의 주파수에서 측정된 발끝 유도전류(평균시간 6분)가 한 발에서 100mA이하이면 표 8의 주2를 만족하지 않아도 좋다. 단, 유도전류가 이 지침치에 대해 무시할 수 없는 레벨의 복수주파수 성분으로 되어 있는 경우에는, 그 각 주파수 성분의 지침치에 대한 비의 제곱을 구하여 그 합이 1을 넘으면 안된다.

(b)조건 G에 있어서 비접지조건을 만족하지 않는 경우

3MHz부터 300MHz의 주파수에서 측정된 발끝의 유도전류(평균시간 6분)가 한 발에서 100mA이하이면 표 8의 주2를 만족하지 않아도 좋다. 단, 유도전류가 이 지침치에 대해 무시할 수 없는 레벨의 복수주파수 성분으로 되어 있는 경우에는, 그 각 주파수 성분의 지침치에 대한 비의 제곱을 구하여 그 합이 1을 넘으면 안된다.

나. 기초지침

기초지침을 표 11에 나타내었다. 기초지침은 관리지침의 근거가 되는 개념인 동시에 생체 작용의 발생가능성을 판단하기 위한 기초가 된다.

표 11.기초지침

(a)전신평균 SAR의 임의 6분간 평균값이 0.4W/kg 이하일 것. (b)10kHz부터 100kHz의 주파수에서 조직내의 유도전류 밀도가 $0.35 \times 10^{-4} f[\text{Hz}] \text{mA}/\text{cm}^2$ 이하(평균시간<1초)일 것. (c)10kHz부터 100kHz의 주파수에서 접촉전류등 체외로부터 유입된 전류가 $10^{-3} f[\text{Hz}] \text{mA}$ 이하(평균시간 1초)일 것. 또 100kHz부터 100MHz의 주파수에서는 100mA이하(평균시간 6분)일 것. (d)위의 (a),(b),(c)와 더불어 주의사항으로 다음을 고려할 것. -전신평균 SAR의 임의 6분간 평균값이 0.4W/kg 이하이더라도 임의 조직 1g당의 SAR(2분간 평균값)가 8W/kg(피부와 팔, 다리에서는 25W/kg)을 넘지 않는 것이 바람직하다. -3GHz 이상의 주파수에서는 눈에 대한 입사전력밀도(6분간 평균값)가 $10 \text{mW}/\text{cm}^2$ 이하인 것이 바람직하다.
--

6. EPA 기준

미국 환경보호국(Environmental Protection Agency : EPA)는 1986년 일반대중에대한 RF 조사를 조절하기 위하여 다음과 같은 4 가지 대안을 제안했다.

- (1)대중에 대한 조사치를 3MHz이상에서 전신평균 SAR 0.04W/kg, 3MHz이하에서 전계강도 87V/m, 자기장도 0.23A/m로 제한
- (2)대중에 대한 조사치를 3MHz 이상에서 전신평균 SAR 0.08W/kg, 3MHz이하에서 전계강도 275V/m, 자기장도 0.73A/m로 제한
- (3)대중에 대한 조사치를 3MHz이상에서 전신평균 SAR 0.4W/kg, 3MHz이하에서 전계강도 614V/m, 자기장도 1.63A/m로 제한.
- (4)RF 조사에 대한 연방 정부의 기준을 채택하는 대신에 건강 영향과 환경측정에 관한 정보를 배부하기 위한 대중 인식 프로그램(public awareness program)을 확립

대안 3은 정상적인 환경에서 RF 조사로부터 건강한 사람을 보호하기 위한 것이고, 대안 1,2는 안전계수를 더 크게 해서 안전도를 높이고 다른 영향에 대한 가능성을 줄이기 위한 것이다.

각 대안은 다음과 같은 장·단점을 가지고 있다.

(a)대안 1,2. 이 대안은 가장 민감한 주민을 포함하여 열적반응에 대하여 “영향없음”을 나타낸다. 이 조사치에서는 내부온도의 변화가 없으며 열조절 반응이 일어나지 않는다.

(b)대안 2. 이 대안도 가장 민감한 주민을 포함하여 열적인 영향에 대하여 “영향없음”을 나타낸다. 이 조사치에서는 내부온도의 변화가 없으며 열조절 반응이 일어나지 않는다. 대안 1이 1982년 ANSI 기준보다 10배 낮는데 비해 이 대안은 5배 낮다.

(c)대안 3. 이 대안은 주변의 높은 온도 및 습도와 민감한 사람을 제외하고는 열적인 영향으로부터 보호한다. 이 조사치는 열조절 반응과 관련된 범위의 하한에 해당하며 이 조사치 아래에서는 일반적인 가열에 의한 영향은 일어나지 않는 것으로 보인다.

전기적인 쇼크와 RF화상을 예방하기 위하여 전기장과 자기장의 세기를 제한할 필요가 있는데 대안 2,3에서 전기장의 세기는 87,275,614V/m이고 자기장의 세기는 0.23, 0.73, 1.63A/m이다. 이 값들은 IRPA, ANSI의 제한치들을 접근시킨 것이다.

1시간 동안 전체 조사시간이 6분 이하이면 EPA는 3MHz이상의 주파수에서 장기간 연속 조사치의 10배로 제한치를 권하고 있다. 즉 6분 동안에 흡수되는 에너지의 양은 연속조사 권고치로 1시간동안 흡수되는 양을 초과해서는 안된다. 3MHz이하에서는 더 높은 조사치가 권고되지 않는데 왜냐하면 쇼크 현상은 조사기간과 무관하기 때문이다.

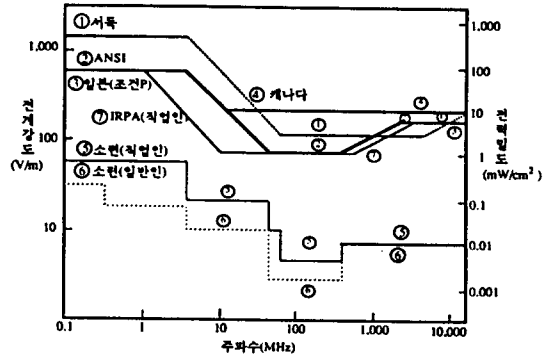
일반적인 환경에서 국부조사와 전신조사를 구별하는 것은 비실제적이다. 따라서 EPA는 제한치가 두 경우 모두에 적용될 것을 제외하고 있다.

7. 주요 제한치 비교

다음은 주요 기준의 제한치를 비교하여 나타낸 것이다.

IV. 맺음말

본고에서는 전자파가 생체에 미치는 영향을 개관해 보고 미국, 일본 및 국제기구로서 IRPA의 인체보



호기준을 소개하였다. 인체보호기준에서의 현재의 추세는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 2가지 표준(대중에 대한 낮은 조사치와 직업인에 대한 높은 조사치)에 대한 필요성이 일반적으로 인정되고 있다.
- 조사제한치는 주파수에 의존하며 조사기간에 따라 변한다.
- 10MHz이하에서 조사제한치는 신체에 유기된 전류 밀도로부터 유도되고 따라서 유기된 전류밀도가 기본제한치(basic limit)로 생각된다. 외부전계 및 자계장도는 유도제한치(derived limit)로 생각될 수 있다.
- 10MHz이상에서는 SAR이 기본제한치로 생각되고 전자계강도 혹은 입사전력밀도는 유도제한치로 생각된다.
- RF쇼크와 화상의 방지는 10MHz이하의 조사제한치를 수립하는데 부가적으로 고려해야 할 사항이다.

전자파가 생체에 미치는 영향은 우리 학계에서도 실험과 이론을 통해 심도있게 수행해야 할 분야이지만 이미 국제적으로 광범히 수행된 연구결과에 대한 조사·분석이 선행되어야 할 것이다. 이러한 문헌연구와 더불어 환경측정 및 역학조사를 병행하고 인체보호와 산업에 미칠 영향을 고려하여 조만간 우리나라의 전자파에 대한 인체보호기준을 수립해야 할 것으로 본다.

참 고 문 헌

1. American National Standards, 1982, Safety

- Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 300MHz to 100GHz, Institute of Electrical and Electronics Eng. inc., 345 East 47th Street, NY10047, ANSI. C95.1
2. U.S.Environmental Protection Agency, 1986, "Federal Radiation Protection Guidance ; Proposed Alternatives for Controlling Public Exposure to Radiofrequency Radiation," Federal Register, 51(146), 27318-27339.
 3. Gandhi, O.P., "Biological Effects and Medical Applications of RF Electromagnetic Fields," IEEE Trans. on Microwave Theory and Technigues, Vol. 30, No.11, 1982.
 4. Romero-Sierra, C.[1990]. Bioeffects of Electromagnetic Waves, Review of Radio Science 1987-1989, Brussels :International Union of Radio Science(URSI).
 5. IRPA[1987], Guidelines on Limits of Exposure to Radiofrequency electromagnetic Fields in the Frequency Range from 100MHz to 300GHz, Health Physics, Vol.54, No.1, pp.115-123, 1988.
 6. IRPA[1989], Interim Guidelines on Limits of Exposure to 50/60Hz Electric and Magnetic Fields, Health Physics, vol. 58, No.1, pp. 113-122, 1990.
 7. DIN VDE Standard 0848, Limits for Electric and Magnefic Fields for the Range 0 to 10MHz, Federal Republic of Germany
 8. Bernhardt, J.H.The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effect, Radiat. Environ. Biophys. 27 : 1-27 ; 1988.
 9. Czerski, P.Extremely low frequency(ELF)electric fields, biological effects and health risk assessment. In : Repacholi,M.H.,ed.Non-ionizing radiations. Physical characteristics, biological effects and health hazards assessment. Proceedings of an INIR Workshop, Melbourne, Australia ;1988 : 255-271.Availible from : Australian Radiation Laboratory, Yallambie, Victoria, Australia 3085.
 10. Gauger,J.R.Household appliance magnetic field survey. Arlington, VA : Naval Electronic Systems Command ;IIT Research Institute Report EO 6549-43 : 1984.
 11. Institute of Electrical and electronics Engineers Working Group on electrostatic and Electromagnetic Effects. Electric and Magnetic field coupling from high voltage AC power transmission lines-classification of short term effects on people. IEEE Trans. Power Appar. syst. 97 : 2248-2252 : 1978.
 12. Kaune, W.T. ; Forsythe, W.C.Current densities induced in swine and rat models by power-frequency electric fields. Bioelectromagnetics 9 : 1-24 ; 1988.
 13. Kaune, W.T. ; Phillips, R.D. ; Anderson, L.E. Biological studies of swine exposed to 60Hz electric fields. Palo Alto, CA :Electrical Power Research Institute ; EPRI-EA4318, Project 799.1 : 1985.
 14. Rupilius, J.P.Investigations on the effects on man of an electrical and magnetic 50Hz alternating field. Freiburg, Germany : Albert Ludwig University ; 1976(in German). Dissertation.
 15. Sander, R. ;Brinkman,J. ;Kuhne,B.Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50Hz electric and magnetic fields. Proceedings of the International Conference on Large High-Voltage Electric Systems ; 1-9September 1982 ; Paris : CIGRE ; (Paper 36-01) ; 1982.
 16. United Nations Environment Programme /World Health Organization /International Radiation Protection Association. Environmental health criteria 35. Extremely low frequency (ELF) fields. Geneva : World Health Organization ; 1984.
 17. United Nations Environment Programme /World Health Organization /International Radiation Protection Association. Environmental health criteria 69. Magnetic fields. Geneva : World Health Organization ; 1978.
 18. Zaffanella, L. E. ;Deno, D.W.Electrostatic and electromagnetic effects of ultra-high-voltage

電磁波技術學會誌 第4卷1號 1993年3月

transmission lines. Palo alto, CA:Electric
Power Research Institute ;Final report, EPRI
EL-802 ;1978.

19. 일본 전기통신기술심의회, 전파이용에 있어서의
인체보호지침, 1990.