

Biological effects of electromagnetic fields at extremely low frequencies

Hai Won Chung

School of Public Health, Seoul National University

극저주파(Extremely Low Frequency : ELF) 대 전자기장(Electromagnetic field)의 생물학적 영향

정 해 원

서울대학교 보건대학원

Abstract—This paper reviews studies on potential health effects of electric and magnetic fields at extremely low frequencies(ELF). Recent studies focus on the epidemiological investigation of cancer, reproductive outcome and neurobehavioral effects due to residential and occupational exposure to ELF. Laboratory experiments are also carried out to find the possible mechanism of biological effects of ELF.

Firm conclusion regarding whether ELF cause cancer are not yet conclusive but suggestive and other health effects of exposure to ELF have also been suggested but the evidence is even weaker than that related to cancer.

요약—본 연구는 극저주파대 전자기장(ELF)의 잠재적 건강위해를 문헌을 통해 고찰하였다. 최근의 연구는 주로 거주지 또는 직업적으로 전자기장에 노출된 사람의 암발생 및 출산결과 그리고 신경행동학적인 영향을 조사하기 위한 역학적 조사가 대부분이다. 또한, ELF의 생물학적 영향을 연구하기 위한 실험적 연구도 수행되고 있다. 현재까지의 연구결과를 보면 ELF가 암을 유발한다고 추정되지만 확정적으로 단정할 수 있는 증거가 부족하며 암 이외의 생물학적 영향도 추정되지만 암과의 연관성 보다는 그 근거가 미약하다.

서 론

최근들어 전기 및 전자기기의 사용이 증가됨에 따라 병원이나 산업체등의 작업장이나 일반가정 그리고 환경으로 부터 전자기장에 노출되는 기회가 증가되고 있다. 즉 병원등의 첨단 전자장비 사용의 증가 및 가

정에서 전기, 오븐등 전기기기 사용 그리고 무선통신의 증가로 인해 일반 송전용 전선으로 부터의 50~60Hz의 극저주파(Extremely low frequency : ELF)대의 파장으로 부터 MHz 대의 microwave과 이상의 전자파에 노출되는 기회는 더욱 증가될 전망이다.

전자기장은 단독 또는 환경내의 화학물질과의 상호

작용으로 인해 인체에 위해요인이 될 수 있다는 각종 연구결과가 보고된[1, 2, 3, 4, 5] 이래 그 유해성에 대한 관심이 증가되고 있다. 과거에는 주로 kHz~MHz 까지의 비교적 짧은 파장인 고주파대의 전기장에 대한 연구[6]가 집중되었으나 최근에는 일반 상용전원인 극저주파인 3~300Hz의 전자기장에 대한 연구가 집중되고 있다. 300kHz 이하 주파수대의 전자기장은 표 1에서 보는바와 같이 분류될 수 있다.

Table 1. Terms commonly used to describe frequency ranges below 300kHz.

Term	frequency range
Extremely low frequency	3 Hz - 3 kHz
Power frequency	50 Hz - 1000 Hz
Very low frequency	3 kHz - 30 kHz
Low frequency	30 kHz - 300 kHz

1979년 Wertheimer and Leeper[7]는 60Hz의 전자기장이 어린이의 각종 암의 발생과 관련이 있다는 역학연구 결과를 보고한 이래 어린이[8]는 물론 어른에서의 암발생과도 연관성이 있다는 보고[9, 10]도 다수 있으며 특히 발전소에 근무하거나 전기장치에 근무하는 근로자에서 암의 발생과의 연관성[11, 12, 13]이 많은 역학조사에서 나타나고 있다. 그러나 이상의 보고와는 전혀 상반되는 연구결과[14, 15, 16]도 다수 보고되고 있고 전자기장이 생체에 미치는 영향 또한 확실하게 설명되지 않고 있기 때문에 안전기준 제정에는 신중을 기하고 있는 실정이다.

1. 전자기장의 기본개념^[1,4]

1) 전기장(Electric field)

전기장은 전하에 의해 생성되는데 이 전하가 움직이게 되면 자기장(magnetic field)을 생성한다.

전기장이나 자기장에 생체가 노출되면 체내에 전류(electric current)가 생성되는데 체내의 각 부분에서의 전류의 분포를 측정할 수 있다.

체표면은 전기장을 차폐할 수 있지만 자기장은 그대로 투과되기 때문에 자기장이 생체내 반응에서 더 중요하다. 전기장의 세기는 일반적으로 E(electric field)=V(Voltage)/m(meter)로 나타내며 체내의 전류는 A(Ampere)=charge/time 으로 표시된다.

2) 자기장(Magnetic field)

자기장도 전하에 의해 생성되는데 전하가 움직이게 될때 생성된다. 전하가 움직이면 전류가 생성되므로 자기량은 전류에 의해 생성된다고 말할수도 있다.

자기장은 magnetic field intensity(H)와 magnetic flux density(B)로 표현된다.

즉, S.I 단위로는

Magnetic field intensity(H) : A(Ampere)/m (meter)

Magnetic flux density(B) : tesla(T) 로 표시하며 $1\mu T=0.8A/m$ 의 관계가 일반적으로 형성된다.

C.G.S 단위로 표시할 경우 flux density는 Gauss(G)로 표시하여 $G=0.0001 T$ 또는 $\mu T=0.01 G$ 가 성립된다.

일반거주지에서 magnetic flux density 는 1 mG(0.1 μT) 정도이다.

2. 전자기장의 발생원^[4,6]

1) 전기장

자연발생원 : 지구상에 전기장이 존재한다는 것이 실험적으로 밝혀 졌는데, 지표면에 있던 양전하가 천둥작용에 의해 대기상층으로 이동될때 형성된다. 지표면 수준의 대기에는 평균 130V/m의 전기장이 형성되지만 천둥이 치는 동안에는 100kV/m 까지 관찰될바 있다.

인공발생원 : 극저주파(Extremely low frequency (3-3KHz)는 발전소, 송전선(transmission) 그리고 배전선(distribution)에서 작업하는 사람들이 직업적으로 폭로되거나 거주지에서 일반인들이 폭로된다.

표 2에서 보는 바와 같이 송전선(electric-power transmission line) 밑의 지표면 수준에서 형성되는 전기장의 크기는 송전선의 전압이 증가함에 따라 증가되는 것을 알 수 있으며 특히 765kV에서는 10kV/m의 전기장이 형성된다.

VDT(Video display terminal)는 ELF와 VLF(very low frequency 3KH-30KHz)의 전자기장을 발생하는데 표 3에서 보는 바와 같이 각 주파수대의 전자기장에서 형성되는 전기장의 세기는 차이가 난다.

Table 2. Typical electric and magnetic field strengths at ground level under electric-power transmission lines.(6)

Voltage, kV	Current, A	Electric field, kV/m	Magnetic field, μT
115	20	1.5	5.0
230	300	2.5	6.1
345	400	3.4	6.8
500	550	6.7	8.4
765	750	10.0	10.0

Table 3. Electric and magnetic fields produced 30 cm in front of video display terminals(VDT).Field produced by VDT differ greatly, so values listed below are not characteristic of all units.(6)

Type of field	Frequency	Value
Electric ^a	0Hz	≤ 1500 V/m
Electric	ELF ^b	≤ 70 V/m
Electric	VLF ^c	≤ 3 V/m
Magnetic	ELF ^d	≤ 0.7 μT
Magnetic	VLF ^e	≤ 0.25 μT

- a) One-half hour after turn on
- b) Extremely low frequency range, produced by changes in data being displayed by VDT
- c) Very low frequency range, produced by fly-back transformer and associated circuitry
- d) Extremely low frequency range, produced by vertical sweep circuitry
- e) Very low frequency range, produced by horizontal sweep circuitry

이외 전기난로, 헤어드라이 등 각종 가정전기기구에서도 전기장이 발생된다. F.M.A.M, V.H.F 그리고 U.H.F. 등의 방송파(radiofrequency)와 radar, 전화소통을 위한 microwave 체계, microwave 오븐 등은 일상적으로 일반인이 폭로되는 발생원이며 이외 의료용으로 가열을 위해 사용되는 microwave 기기조작자에게도 영향을 주게 된다.

전기작업종사자(electrical worker)[17]에 대한 전기장의 세기는 표 4와 같다.

2) 자기장

지구는 geomagnetic field라 알려져 있는 전자기장(static magnetic field)을 생성하는데 이 장의 세기는 $30\mu T(0.3G) \sim 70\mu T(0.7G)$ 에 다르다.

천둥이나 태양광작용(solar activity) 등 자연현상에

의해 50Hz-1000Hz 범위의 주파수대를 가진 자기장을 형성하는데 이 장의 세기는 비교적 낮아서 $0.01\mu T(0.1mG)$ 에 지나지 않지만, solar activity등 지구의 자기장의 변동에 의할때는 $0.5\mu T(0.5mG)$ 까지 나타난다.

자연적으로 나타나는 자기장 보다는 인위적 발생원으로 부터 생성되는 자기장에 거주지나 직장에서 폭로되는 경우가 중요한데 거주지에서 폭로되는 자기장의 세기는 $0.3\mu T(0.3mG)$ 이며 전기담요로 부터는 $0.25 \sim 0.75\mu T(2.5mG - 7.5mG)$ 로 나타났다.

직업적으로 피폭되는 경우는 arc welder가 $41\mu T(41mG)$ 그리고 철강산업에 종사하는 경우 $70mT(700G)$ 에까지 이른다.

전기작업종사자등이 피폭되는 자기장의 세기는 표 5에서 보는 바와 같다[17].

이외 송전선 밑이나 VDT에서 발생하는 자기장의 세기는 표 2, 3에서 보는 바와 같다.

전기장은 효과적으로 차폐가 가능하지만 자기장을 차폐하기 위해서는 50Hz-1000Hz의 주파수대인 power frequency 의 경우 ferromagnetic 재질을 사용하여야 하는데 이는 매우 크고, 무거우며 효과가 제한적이기 때문에 사용에 어려움이 있다[18].

3. 전자기장이 생물체에 미치는 영향

전자기장이 생물체에 미치는 영향에 관한 연구는 사람을 대상으로 수행된 역학연구, 동물을 대상으로한 연구, 그리고 실험실에서 이루어진 연구로 구분된다.

사람을 대상으로 수행된 역학연구는 암발생에 미치는 영향, 출산결과에 미치는 영향, 그리고 신경생리학적 영향에 관한 연구로 대별된다.

일반적으로 역학연구를 수행시 가장 큰 제한점은 폭로수준을 측정하는 방법의 문제인데, 연구자에 따라 다양한 측정방법을 이용[18]하고 있다. 즉, 거주지로부터의 폭로수준을 측정하기 위해서 가정용 전기제품의 종류 및 사용빈도를 설문조사를 통해 알아보는 경우, 전선의 배열형태에 따른 폭로정도를 구분하는 경우(wire configuration coding) 등 간접적으로 측정하거나, 직접 고정된 거주지에 측정기기를 설치하는 경우 및 개인용 측정기를 이용하는 방법을 들 수 있다.

직업적 피폭인 경우, 직업의 종류에 따라 피폭수준을 측정하는 간접적인 방법과 개인용 측정기를 이용하는 직접적인 방법을 들 수 있는데, 각 측정방법사이에 상당한 차이가 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한

Table 4. Occupation and residential exposures to ELF electric fields(17).

Job class	Environments	N	Electric field, V/m	
			Geometric mean	Range
Electricians	Industrial power supply	1	4	—
Power line workers	Undergroun lines	2	0.8	0.5-1.2
	Overhead lines	2	158	120-206
	Home hook-ups	13	4	0-71
Welders/flame cutters	TIG	1	2	—
Power station operators	Transmission stations	3	290	165-621
	Distribution substation	3	72	22-222
	Generating station	7	0.4	0-4
	Control rooms	4	1	0.3-24
Electronic assemblers	Sputtering	1	6	—
	Soldering	2	8	8-9
	Microelectronics	2	2	0.8-3
Projectionists	Xenon arc	4	1	0-2
Forklift operators	Battery powered	1	0.2	—
Electronics engineers and technicians	Laser lab	4	2	0.6-8
	Calibration lab	4	2	0.5-4
	Office	1	1	—
Radio and TV repairers	Repair shops	11	45	4-110
Radio operators	Dispatchers	1	1	—
Electrical workses	All	67	5	0-620
Residential	in homes	178	2.5	0-79

측정상의 부정확 때문에 암발생등 생물학적 영향을 평가할 때 논란의 대상이 되고 있다.

1) 사람을 대상으로한 연구

① 암

Wertheimer와 Leeper (1979)[7]는 Colorado Denver에서 1950-1973년 사이에 암으로 사망한 344명의 어린이를 대상으로 한 연구로서 백혈병등 각종 암 발생과의 연관이 있다는 보고 이래 여러 연구자에 의해 어린이가 암 뿐만 아니라 성인에서의 각종 암 발생과 관계있다는 연구결과가 다수 보고[9, 10, 19, 20, 21, 22, 23]되었다(표 6).

직업적으로 피폭되는 근로자들에서 각종 암 발생과의 연관성은 보고되고 있으며, 주로 백혈병, 뇌종양, 그리고 melanoma와의 연관성을 보고하고 있다.

Savitz와 Loomis[13]는 1995년에 미국내 5대 전기 회사 근로자 138,905명을 대상으로 한 대규모 코호트 연구에서 각 직종에 따른 암종별 상대위험비를 구하였는데 뇌종양의 경우 근무기간에 따라, 그리고 자기

장의 세기에 따라 양반응관계를 확인하였으나 백혈병과의 연관성은 거의 없다고 보고한 바 있다.

전자기장과 각종 암종과의 연관성에 관해 많은 역학연구가 수정되었으며 연구자마다 결과가 상이하게 보고되고 있지만 뇌종양과는 강한 연관성을, 백혈병과는 약한 연관성을, 그리고 melanoma는 연관성의 가능성을 보여준다고 요약될 수 있다.

Savitz(1990)[20]는 임신중에 피폭된 경우 어린이의 뇌종양 발생과 강한 연관성[OR2.5 95% CI(1.1-5.5) (0.8-3.6)²]을 보여주었지만, 출산후에는 전혀 연관성이 없었다고 보고하였다.

흥미로운 보고는 부친이 피폭된 경우 어린이의 뇌종양 발생이 크게 증가한다는 보고[24]도 있지만 이를 뒷받침할 연구는 없었다.

neutrophil이나 macrophage같은 nonlymphocyte는 침입하는 세포를 죽이기 위해 oxygen radical을 생성하는데[25] 이때 세포내의 Ca농도와 분포가 세포내 oxidation activity를 조절하게 된다. 그래서 전술한바

Table 5. Occupation and residential exposures to ELF electric fields(17).

Job class	Environments	N	Magnetic field, μ /T	
			Geometric mean	Range
Electricians	Industrial power supply	1	10	—
Power line workers	Underground lines	3	5.7	3.8—9.1
	Overhead lines	2	4.2	3.2—5.7
	Home hook-ups	14	0.11	0.004—1.2
Welders/flame cutters	AC	4	4.1	2.4—9.0
	DC	4	0.65	0.4—1.6
Power station operators	Transmission stations	3	3.9	1.6—7.2
	Distribution substation	3	2.9	0.7—5.4
	Generating station	12	0.60	0.01—12
	Control rooms	8	0.21	0.1—0.4
Electronic assemblers	Sputtering	2	2.4	1.4—4.3
	Soldering	2	0.13	0.13—0.16
	Microelectronics	3	0.003	0.001—0.006
Projectionists	Xenon arc	7	1.4	0.1—4.5
Forklift operators	Battery powered	9	1.2	0.09—125
Electronics engineers and technicians	Laser lab	9	1.1	0.2—20
	Calibration lab	4	0.06	0.05—0.07
	Office	1	0.02	—
Radio and TV repairers	Repair shops	11	0.63	0.1—2.6
Radio operators	Dispatchers	3	0.03	0.02—0.04
Electrical workses	All	105	0.50	0.001—125
Residential	in homes	181	0.06	0.005—1.1

와같이 전자기장에 의해 Ca의 평형이 깨어지게 되거나 oxidative stress가 증가되면 조혈조직보다 nonlymphocyte가 더 영향을 받게되는데 이 사실로 전자기장과 nonlymphocyte leukemia와의 연관성을 설명할 수 있다[26,27].

또한 앞서 설명한 melatonin은 성호르몬의 생산을 억제하는데[28] 전자기장에 의해 melatonin의 생성이 억제되면 성과 연관된 암 즉 유방암이나 전립선암에 대한 암발생위험이 증가될 수 있다[29,30].

② 출산결과(reproductive outcome)

reproductive outcome 으로는 출생시 체중, 자연유산, 사산, 미숙아 출생, 선천성 기형등을 들수 있는데 전자기장과 연관관계는 역학적 연구가 충분치 않다.

대부분의 역학연구에서와 마찬가지로 피폭정도를 측정하는 방법으로 설문조사를 통해 직업력을 보고 간접적으로 확인하거나 직접 기뢰로서 측정하는 방법이 있지만 측정의 부정확성 및 질병발생에 관계되는

여러 복합적인 요인등을 충분히 고려해야 하기 때문에 인과관계를 단정적으로 확인할 수는 없다.

일반인등을 대상으로 이루어진 Wertheimer 와 Leeper(1986)[31, 32]의 역학연구를 보면 부모가 전기담요를 사용한 경우 태아의 성장이 저하되었으며 유산률도 증가되었다고 보고하였으나, 관계없다는 보고[33]도 있는데 폭로정도를 측정하는 기준이 모호하기 때문에 단정적으로 말할 수는 없다.

직업적으로 피폭되는 경우의 연구는 Knave등(1979)[34]에 의해 처음으로 시행되었는데 고압(50Hz, 400 kv) 환경에서 근무하는 사람에서는 낮은 전압에서 근무하는 사람보다 자녀수가 적고 또한 남아의 출생 비율이 높다고 보고하였다.

Nordstrom등(1983)[35]은 고압환경에서 근무하는 사람에서 자연유산, 주산기사망, 기형, 성비의 변화를 보고하였으며 이후 여러 연구에서 저출생 및 성비의 변화, 유산 등 전자기장이 생식능력에 미치는 영향을 보고하고 있다.

Table 6. Association of exposure to ELF with cancer

Reference	Study design	Exposure estimator	Cancer type*	Relative risk estimate	95% CI
Childhood cancers					
(7)	Case control	Wire code(birth addresses)	Leukemia	OR=2.28	1.97-2.65
			Nervous system	2.48	1.16-2.36
			Lymphoma	2.36	1.66-3.35
(8)	Case control	Wire code	Leukemia	OR=2.2	1.1-4.3
(9)	Case control	Wire code	All	OR=1.53	1.04-2.26
			Nervous system	2.04	1.11-3.76
			Leukemia	1.54	0.90-2.63
(10)	Case control	Field measurement	All	OR=2.12	1.73-2.59
			Nervous system	3.86	1.63-8.39
			Leukemia	0.34	0.17-0.68
(14)	Case control	Wire code	Leukemia	OR=1.08	1.00-1.16
(20)		Prenatal electric blanket use	Leukemia	1.7	0.8-3.6
			Brain	2.5	1.1-5.5
		postnatal electric blanket use	Leukemia	1.5	0.5-5.1
			AcLL	1.9	0.6-6.5
			Brain	1.2	0.3-5.7
Adult cancers					
(13)	Retrospective cohort	personal measurement	All	RR=1.22	1.09-1.37
			Leukemia	1.11	0.57-2.14
			Brain	2.29	1.15-4.56
(15)	Cohort	Distance	All	SMR=0.87(men)	0.78-0.95
				SMR=0.92(women)	0.83-1.01
			Leukemia	SMR=0.61(men)	0.07-2.19
				SMR=1.54(women)	0.42-3.94
(16)	Case control	Wire code	ANLL	OR=1.45	0.54-3.88
(19)	Case control	Distance to power lines	Leukemia	OR=1.45	0.54-3.88
		Distance to substation	Leukemia	0.99	-
(21)	Case control	Wire code	All	OR=1.39	1.21-1.58
(22)	Cohort	Job title	All	RR=1.15	1.10-1.20
			Larynx	1.46	1.05-2.03
			Mesopharynx	2.30	1.11-4.79
			Lung	1.52	1.35-1.72
			Colon	1.20	1.02-1.43
			Bladder	1.22	1.04-1.26
			Cervix	1.14	2.04-1.26
			Melanoma	1.35	2.05-2.76
(23)	Case control	Electric blanket use	Testicular	OR=1.0	0.7-1.4

* AML, acute myelogenous leukemia ; CML, chronic myelogenous leukemia ; ANLL, acute nonlymphoid leukemia ; AcLL, acute lymphoid leukemia.

특히 임신등 VDT에 피폭된 경우 자연유산[36], 기형[37] 등과의 연관성을 보고하고 있지만 Schnorr등(1991)[38]의 최근 연구에서는 심리적인 요인 및 인간공학적 요인(ergonomic factor)을 고려하게 되면 연관성을 찾을수 없다고 보고한 바 있다.

③ 신경생리학적인 영향

neurobehavioral outcome에 관한 많은 연구가 전자기장에 피폭된 사람을 대상으로 이루어졌는데 반응 시간, vigilance(불면증),단시간 기억, 인지(perception), psychiatric symptom(정신질환), self-reported memory loss 그리고 manual dexterity(기민함) 등을 측정하였다[39].

Knave 등(1979)[34]은 고압환경에 근무한 사람들과에서 위의 심리 검사에서 유의한 차이를 찾아볼 수 없었다고 보고하였다.

그 후 대부분의 연구에서도 유의한 결과는 보고되지 않았으며 전자기장과 자살,우울증과의 관계를 연구한 Reichmanis등(1979)[40]의 연구결과에서나 그 후의 연구[41]에서도 전자기장과의 유의한 관계를 보고하지 않았다.

2) 동물을 대상으로한 연구

① 신경내분비계(Neural and neuroendocrine system)

많은 동물실험결과는 신경계통과 직접 또는 간접적으로 연관되어 있다. 과거의 연구는 주로 놀람반응 형태를 평가하거나 corticosteroid등의 stress와 연관된 호르몬의 평가 그리고 뇌파(electroencephalogram)와 inter-response time같은 중추신경계[4]를 측정하는 분야로 대열 할 수 있지만 연구결과는 서로 상치되는 경우가 많았다.

이후에 여러 신경학적인 평가방법을 도입하면서 행동양상이외에 specific neurosystem response를 반응 결과로 이용하게 되었다.

즉 전자기장과 조직사이의 상호반응의 양상과 그 정도를 결정하거나 관찰된 생물학적 영향의 기전을 밝히는 연구가 진행되고 있다.

전자기장을 인지하는 정도는 흰쥐의 경우 4-10 kV/m 이며 생쥐, 돼지, 비둘기 그리고 닭등은 25-35 kV/m로 나타났다[4].

생체리듬과의 연관성을 연구한 결과는 다수 있는데 원숭이가 39kV/m, 100 μ T(80 A/m)의 전자기장에

노출되게되면 생체 리듬이 변화한다는 것을 보고[42] 하였으며 자기장에 노출된 rat에서 melatonin의 생성이 감소한다는 것이 알려졌다[43].

전자기장에 의해 생체 리듬이 깨어진다는 것은 확실하지만 이것이 건강에 미치는 영향에 대해서는 확실치 않다.

전자기장에 의한 신경학적인 영향은 높은 전기장(100kV/m)[44]이나 높은 자기장(5mT,4kA/m)[45]에 오랜기간 노출되어도 병리학적인 변화가 나타나지 않지만 신경계와 관련된 영향으로서는 neuronal excitability의 변화, 메라토닌의 변화, 전자기장을 선호하는 행동양식의 변화 그리고 뇌파(EEG)의 변화등이 보고되었다. 또한 몇가지 실험에서 serum catecholamine의 변화, corticosteroid의 변화, 그리고 뇌의 형태의 변화등이 관련되어 있을 가능성이 보고되었지만 확실치는 않다[4].

② 생식과 발생(reproduction and development)

45Hz, 14mT(110A/m)의 전자기장에 피폭된 병아리의 경우 성장능도가 감소되었음이 보고[46] 되었으며 0.12 또는 12T에 피폭된 계란의 경우 기형이 증가되었다고 보고[47]하였다.

그러나 20-240kV/m에 전기장에 피폭된 rat, 토끼, 그리고 생쥐등에 있어서 생식,생존,성장 그리고 발생에 영향을 주지 않았다는 보고[48]도 있다.

대부분의 연구는 전자기장의 영향을 부인하고 있지만 앞에서 언급된 영향에 대해서 더욱 연구가 필요하다.

③ 기타 생물학적인 기능에 미치는 영향

전자기장이 심혈관계에 미치는 영향에 의한 연구의 경우 10kV/m의 전기장에 노출된 개에서 혈압이 상승되었다는 보고[4]도 있지만 100kV/m에 노출되도 영향이 없다는[49] 결과가 보고 되는 등 일관성 있는 연구결과가 없다. 또한 혈액학적 양상에 미치는 영향도 서로 다른 결과가 보고되고 있다.

생체의 면역계에 미치는 영향은 일반적으로 음성으로 나타나지만 림프구의 세포독성이 감소된다는지, mitogen이나 antigen에 대한 반응이 영향을 받는다는 보고[4]도 있다.

4. 전자기장의 생물학적 작용기전

전술한 바와 같이 전기장이나 자기장에 의해서 생

체내에 전류가 유도되는데 유도되는 정도는 신체부위에 따라 차이가 난다.

그림 1[50]에서 보는 바와 같이 60Hz-10kV/m의 전기장에 노출되었을때 유도되는 전류는 대부분 0.04 A/m² 이하로서 신경세포가 느낄수 있는 역치수준이 1A/m²의 4% [51]에 지나지 않는다.

전자기장과 암 발생과의 연관성을 설명하기 위해 전자기장의 생물학적 기전이 완전히 구명된 것은 아니며 현재까지 연구된 가설은 다음과 같이 몇가지로 요약될 수 있다.

1) DNA 돌연변이

전자기장은 DNA에 직접 손상을 미치지 않는다는 것으로 알려져 있으며[52] 배양중인 CHO 세포나 mice에 전기장을 노출시켜도 염색체 이상 및 자매 염색체 교환빈도에 영향을 미치지 않는다는 보고[53]도 있지만 소핵실험에서 양성반응을 보고[54]한 결과도 있으며 DNA 손상회복에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 없었다.

2) DNA 전사과정과 해독과정에 미치는 영향

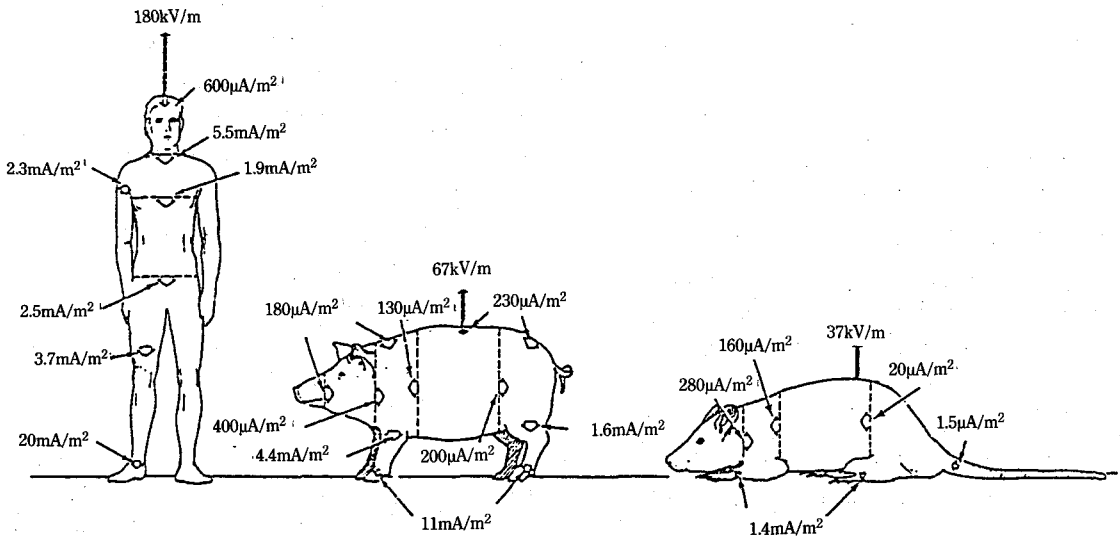
전자기장이 직접 DNA에 작용은 하지않지만

mRNA와 단백질 합성에 영향을 줄 수 있음이 보고[55]되었는데 전자기장에 노출된 dipteran의 salivary gland에서 RNA전사가 증가 되었고 단백질 합성형태가 높은 전하를 띄는 낮은 분자량의 단백질로 변화되었다는 보고를 미루어 볼때 mRNA로부터 단백질로 전사되는 과정이 방해받는 다는 사실을 알 수 있다.

3) Calcium에 미치는 영향

전자기장이 세포내의 Ca과 ion flow의 균형에 영향을 미친다는 연구가 보고[56] 되었다.

즉 diatom의 운동성은 배지내의 Ca의 농도에 의존하는데 특정 주파수 및 세기의 전자기장에 의해 영향을 받는다는 보고[57] 및 bone healing시 plasma membrane에서 osteoblast에 hormone이 결합하는 것을 방해하거나 membrane에서 receptor-cyclase coupling을 방해함으로써 나타나게 되는데 이는 Ca²의 이동이 관여하기 때문[58]이라고 보고되고 있다. 13.6 Hz의 자기장(peak : 20μT)는 정상 림프구와 lymphoma cell line에서의 calcium intake를 2배 증가시킨다는 것이 보고 되었다. 즉 Ca 농도와 세포내 Ca의 분포가 여러 세포기능에 영향을 주는데 특히 림프구의 활성화나 증식에 중요한 역할을 하는 proteinkinase



Note. Surface r.m.s. electric field measurements are shown for human and pig, and surface r.m.s. electric field estimates for rats. Estimated axial current densities averaged over selected sections through bodies are shown. Calculated current densities perpendicular to surface of body are shown for human and pig. Relative body sizes are not to scale.

Source : Kaune & Phillips(50).

Fig 1. Effects of a vertical electric field of 60Hz and 10kV/m on grounded human, pig and rat

C 에 영향을 준다는 것이 알려졌다.

세포내의 calcium homeostasis가 깨어지면 유해화 학물질이나 전리방사선 등의 oxidative stress를 방어 하는 능력이 저하되어 free radical이 증가되어 암 발 생이 증가될수가 있다.

또한 전자기장은 chemical tumor promotor와 상승 작용을 나타낸다는 보고[59]도 있다.

4) Ornithine decarboxylase(ODC)

ODC는 polyamine의 생합성에 필요하고 특히 빠른 속도로 증식하는 세포에 높은 농도로 존재한다.

tumor promotor인 TPA 는 세포내의 ODC 활성을 증가시킨다.

Byus등(1987)[5]의 연구에 의하면 낮은 수준의 (10 mV/m), 60Hz 전자기장에 각종 세포를 1시간 노출하면 ODC 활성도가 증가된다는 것이 밝혀 졌다.

특히 전자기장에 노출된 세포는 TPA에 의해 ODC 수준이 더욱 증가된다고 보고[60]되고 있다.

5) Immune funtion 60Hz의 전자기장에 폭로되면

T-림프구의 세포독성이 20%가 감소되었다는 것이 보고[61] 되었으며 높은 자기장 및 휘발성 Aromatic hydrocarbon에 폭로된 근로자에게서 B cell lymphoma의 발생이 늘다는 것이 알려졌다[62].

이경우 T_4/T_8 비가 T_8 의 증가로 인해 변화된 것이 관찰 되었다.

6) Pineal Funtion

pineal gland는 neuroendocrine의 transducer인데 낮과밤의 주기에 맞는 hormonal signal을 나타내 준다.

melatonin은 주된 pineal hormon인데 이는 여타 endocrine gland에 대해 억제작용을 한다.

melatonin의 양이 감소되면 뇌하수체의 prolactin 분비가 증가되고 생식선에 대한 estrogen 과 testosterone의 분비가 증가된다. melatonin의 생성은 retina에 의해 빛이 인지되면 감소되기 때문에 melatonin의 양은 주간에는 감소되고 야간에는 증가된다.

Cohen(1979)[63] 등은 melatonin이 생성이 감소 되면 estrogen 양이 증가되며 유방조직의 증식을 자극하기때문에 유방암과의 관련성이 있음을 보고하였다. 전자기장은 melatonin의 생성을 감소 또는 억제 하는 것으로 보고[43,62]되어 있기 때문에 유방암 및 전립선암등 호르몬 의존성인 암종과의 연관성을 설명 해 줄 수 있다.

5. Exposure guideline

현재까지 밝혀진 전자기장의 생물학적 영향은 전술 한 바와 같이 동물실험결과나 역학연구에서 보는 바와 같이 다양하기 때문에 결론적으로 단정지을 수는 없다.

그러나 International Non-ionizing Radiation Committe of International Radiation Protection Association(IRPA/INIRC) 는 1988년에 100kHz 부터 300 GHz까지의 고주파대의 전자기장에 대한 일반인 및

Table 7. Occupational exposure limits to radiofrequency electromagnetic fields(63)

Frequency range (MHz)	Unperturbed RMS electric field strength	Unperturbed RMS magnetic field strength	Equivalent plane wave power density	
	(V/m)	(A/m)	W/m ²	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	3/f ²	0.008/f ²	f/40	f/400
>2000-300000	137	0.36	5.0	5

B These value are provided for information only, and are not to be considered for determining compliance.

NoteB. Hazards of BF burns should be eliminated by limiting currents from contact with metal objects. In most situations this may be achieved by reducing the E values from 614 to 194V/m in the rage from 0.1 to 1MHz and from 614/f to 194/f² in the range from >1 to 10MHz. f=frequency in MHz.

Table 8. Exposure limits to radiofrequency electromagnetic fields for the general public(63)

Frequency range (MHz)	Unperturbed RMS electric field strength	Unperturbed RMS magnetic field strength	Equivalent plane wave power density	
	(V/m)	(A/m)	W/m ²	mW/cm ²
0.1-1	87	0.23/f ^a	-	-
>1-10	87/f ^a	0.23/f	-	-
>10-400	27.5	0.073	2	0.2
>400-2000	1.375/f ^a	0.0037f ^a	f/200	f/2000
>2000-300000	61	0.16	10	1

Note. f, frequency in MHz.

직업적 피폭한도에 대한 잠정적인 guideline 을 설정 [65]한 바 있고(표 7, 8) 1991년에는 50/60Hz대의 극저주파대에 대한 잠재적인 guideline을 설정[66]하였다(표 9).

특히 50/60Hz 의 상용전원대의 전자기장에 대한 한도는 직업적 피폭의 경우 일일작업시간 기준으로 10 kV/m, 0.5mT(5G), 단시간 폭로일때 30 kV/m, 5mT (50G) 인데 전기장의 경우 폭로시간과 전기장의 세기를 곱한값이 80이 넘지 말아야 한다고 규정하고 있다. 일반인의 경우 24시간 폭로시 5 kV/m, 0.1mT(1G) 그리로 하루에 수시간정도 폭로시에는 10kV/M,1mT (10G) 까지 허용하지만 이때도 유도된 전류가 2 mA/m²을 넘지말아야 된다고 규정하고 있다.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH)의 1995-1996년의 TLV 규정 [67]을 보면 30kHz이하의 전자파는 sub-radiofrequency라 하여 직업적 피폭의 경우 0-100Hz의 전자기장은 25kV/m을 넘지 말아야 한다고 규정하고 있으며 자기장의 경우 어떤 한 순간에서도 초과되는 안되는 ceiling value는 B_{TLV} in mT=60/f in Hz로서 60Hz인 경우 1mT가 된다.

특히 심장박동계나 의료용전자기기를 착용하고 있는 사람의 경우 50-60Hz의 전기장에서 1kV/m 그리고 자기장의 경우 0.1mT 이하를 권고하고 있다.

6. 요약

현재까지의 연구결과를 종합해보면 여러 역학조사 결과 ELF 전자기장의 폭로와 암 발생을 강력하게 연관짓기에는 아직 증거가 부족하다. 그러나 전자기장의

Table 9. Limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields(64)

Exposure characteristics	Electric field strength kVm ⁻¹ (rms)	Magnetic flux density mT(rms)
Occupational		
Whole working day	10	0.5
Short term	30 ^a	5 ^b
For limbs	-	25
General public		
Up to 24h d ^{-1c}	5	0.1
Few hours per day ^d	10	1

- a) The duration of exposure to fields between 10 and 30 kVm⁻¹ may be calculated from the formula t = 80/E, where t is the duration in hours per work day and E is the electric fields strength in kVm⁻¹
- b) Maximum exposure duration is 2 h per work day
- c) This restriction applies to open spaces in which members of the general public might reasonably be expected to spend a substantial part of the day, such as recreational areas, meeting grounds, and the like.
- d) These values can be exceeded for a few minutes per day provided precautions are taken to prevent indirect coupling effects.

폭로로 인해 암이 발생했다는 여러 연구결과를 볼때 대규모의 역학조사는 물론 실험동물을 대상으로 장기간 피폭시의 효과를 조사하기위한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. J.A Elder, P.A. Czernski, M.A. Stuchly, K.H. Mild and A.R. Sheppard, Radiofrequency radiation in "Nonionizing radiation protec-

- tion" Suess, M.J. and D.A. Benwell-Morison Eds., WHO Regional Publication, European Series, No. 25. 117-173, (1989).
2. R.E. Shore, "Electroamgnetic radiation and cancer", *Cancer*, **62** : 1747-1754, (1988).
 3. K. Sheikh, "Exposure to electromagnetic fields and role of leukemia", *Archives of Environmental Health*, **41** : 56-63, (1986).
 4. L.E. Anderson and W.T. Kaune, "Electric and magnetic fields at extremely low frequencies", in *Nonionizing radiation protection* : Suess, M.J. and D.A. Benwell-Morison Eds., WHO Regional Publication, European Series, No. 25. 175-243, (1989).
 5. C.V. Byus, S.E. Pieper and W.R. Adey, "The effects of low-energy 60Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme decarboxylase", *Carcinogenesis*, **8** : 1385-1389, (1987).
 6. W.T. Kaune, "Introduction to power-frequency electric and magnetic fields", *Environmental Health Perspectives Supplements 101, Supplements 4*, 73-81, (1993).
 7. N. Wertheimer and E. Leeper, "Electrical wiring configurations and childhood cancer", *Am. J. of Epidemiol.*, **109** : 273-284, (1979).
 8. S.J. London, D.C. Thomas, J.D. Bowman, E. Sobel, T.C. Cheng and J.M. Peters, "Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia", *Am. J. of Epidemiol.*, **134** : 923-937, (1991).
 9. D.A. Savitz, H. Wachtel, F.A. Barnes, E.M. John and J.G. Tvrdik, "Case control study of childhood cancer and exposure to 60Hz magnetic fields, *Am. J. of Epidemiol.*", **128** : 21-38, (1988).
 10. L. Tomenius, "50Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county", *Bioelectromagnetics*, **7** : 191-207, (1986).
 11. S. Milham, "Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields", *New Eng. J. of Med.*, **27** : 413-419, (1985).
 12. W.E. Wright, J.M. Peters, and T.M. Mack, "Leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields", *Lancet*, 1160-1161, (1982).
 13. D.A. Savitz and D.P. Loomis, "Magnetic fields exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers", *Am. J. of Epidemiol.*, **141** : 2, 123-134, (1995).
 14. J.P. Fulton, S. Cobb, L. Preble, L. Leone, and E. Fomman, "Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island", *Am. J. of Epidemiol.*, **111** : 292-296, (1980).
 15. M.E. McDowall, "Mortality of persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities", *Br. J. of Cancer*, **53** : 271-279, (1986).
 16. R.K. Severson, R.G. Stevens, and W.T. Kaime, "Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic field", *Am. J. of Epidemiol.*, **128** : 10-20, (1988).
 17. J.D. Bowman, D.W. Garabrant, E. Sobel and J.M. Peters, "Exposures to extremely low frequency(ELF) electromagnetic fields in occupations with electrical leukemia rates", *Appl. Ind. Hyg*, **3** : 189-194, (1988).
 18. W.T. Kaune, "Assessment Human exposure to power-frequency electric and magnetic fields", *Environmental Health Perspectives Supplement 101, Supplement 4*, 121-133, (1993).
 19. M.P. Coleman, C.M.J. Bell and M. Primic-Zakelj, "Leukemia and residence near electricity transmission equipment : a case-control study", *Br. J. Cancer*, **60** : 793-798, (1989).
 20. D.A. Savitz, E.M. Hone and R.C. Klecknen,

- "Magnetic field exposure from electrical applications and childhood cancer", *Am. J. Epidemiol.*, **131** : 763-773, (1990).
21. N. Wertheimer and E. Leeper, "Adult cancer related to electric wire near the home", *Int. J. Epidemiol.*, **11** : 345-355, (1982).
 22. D. Vagero and R. Olm, "Incidence of cancer in the electronic industry using the new Swedish Cancer Environment Registry as a screening instrument", *Br. J. Ind. Med.*, **40** : 188-192, (1983).
 23. R. Vererault, N.S. Weiss, K.A. Hollenbach, C.H. Strader, and J.R. Daling, "Use of electric blanket and risk of testicular cancer", *Am. J. Epidemiol.*, **131** : 759-762, (1990).
 24. M.R. Spitz and C.C. Johnson, "Neuroblastoma and paternal occupation", *Am. J. Epidemiol.*, **121** : 924-929, (1985).
 25. D.W. Sawyer, T.A. Sullivan, G.L. Mandel, "Intracellular free calcium licalization in neutrophils during phagocytosis", *Science*, **230** : 663-666, (1985).
 26. D.A. Savitz and E.E. Calle, "Leukemia and occupational exposure to electromagnetic field : review of epideimology", *J. Occup. Med.*, **29** : 43-51, (1987).
 27. R.G. Stevens and D.R. Kalkarf, "Iron, radiation, and cancer", *Environmental ahealth Perspect*, **87** : 291-300, (1990).
 28. L. Tamarkin, C.J. Baird and O.F. Almeida, "Melatonin : a coordinating signal for mammalian reproduction ? ", *Science*, **227** : 714-720, (1985).
 29. R.G. Stevens, "Electric power and breast cancer : a hyphthesis", *Am. J. of Epidemiol.*, **125** : 556-561, (1987).
 30. A.Lerchl, K.O. Nonaka, K.A. Stokkan and R.J. Reiter, "Marked rapid alterations in nocturnal pineal serotonin metabolism in mice and rats exposed to weak intermittent magnetic field", *Biochem. Biophys. Res. Comm.*, **129** : 102-108, (1990).
 31. N. Werthermer and E. Leeper, "Possible effects of electric blanket and heated waterbeds on fetal development", *Bioelectromagnetics*, **7** : 13-22, (1989).
 32. N. Werthermer and E. Leeper, "Fetal losses associated with two seasonal sources of electromagnetic field exposure", *Am. J. Epidemiol.*, **129** : 220-224, (1989).
 33. L. Dlugosz, J. Vena, M. Zielezny, T. Byers, G. Roth and E. Marshall, "Congenital malformation and periconceptual use of electric blankets and heated waterbed : a register based case-control study", *Am. J. Epidemiol.*, **132**, 763, (1990).
 34. B. Knave, F. Gamberale, S. Bergstrom, B. Birke, A. Iregren, B. Kolmodinhledman, and A. wennberg, "Long-term exposure to electric field : a cross sectional epidemiological inmvestigation of occupationally exposed workers in high voltage substation", *Scan. J. Work Envirn. Health*, **5** : 115-125, (1979).
 35. S. Nordstrom, E. Birke and L. Gustavssm, "Reproductive hazards among workers at high voltage substations", *Bioelectromagnetics*, **4** : 91-101, (1983).
 36. G.C. windham, L. Fenster, S.H. Swan and R.R. Neutra, "Use of video display terminals during pregnancy and the risk of spontaneous abotion, low bith weight, or intrauterine growth retardation", *Am. J. Ind. Med.*, **18** : 675-688, (1990).
 37. M.K. Goldhaber, M.R. Polen and R.A. Hialt, "The risk of miscarriage and birth defects among women who use visual display terminals during pregnancy", *Am. J. Ind. Med.*, **13** : 695-706, (1988).
 38. T.M. Schnorr, B.A. Grajewski, R.W. Hornung, M.J. Thun, G.M. Egeland, W.E. Murray, D.L. Conover and W.E. Halperin, "Video display terminals and the risk of spontaneous abortion", *New Engl. J. Med.*, **324**

- : 727-733, (1991).
39. B.T. Stollery, "Effect of 50Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills", *Rr J. Ind. Med.*, **43**, 339-349, (1986).
 40. M. Reichmanis, F.S. Perry, A.A. Marino and R.O. Berker, "Relation between suicide and the electromagnetic field of overhead power lines", *Biol. Chem. Phys*, **111** : 395-403, (1979).
 41. F.S. Perry, M. Reichmanis, A.A. Marino and R.O. Becker, "Environmental power frequency magnetic field and suicide", *Health Physics*, **41** : 267-277, (1981).
 42. F.M. Sulzman, "Effects of electromagnetic fields on circadian rhythms" in : Assessments and viewpoints on the biological and human health effects of extremely low frequency electromagnetic field, Arlington, VA. American Institute of Biological Science, 337-350, (1985).
 43. H.A. Welker, P. Semm, R.P. Willig, J.C. Commentz, W. Wiltschko and L. Vollrath, "Effects of an artificial magnetic field on serotonin N-acetyltransferase activity and melatonin content of the rat pineal gland", *Exp. Brain Res.*, **50** : 426-432, (1983).
 44. L.E. Anderson, "Interaction of ELF electric and magnetic field with neural and neuroendocrine system", in Biological and human health effects of extremely low frequency electromagnetic fields, Arlington, VA. American Institute of Biological Science, (1985).
 45. T.S. Tenforde, "Biological effects of ELF magnetic field" in : Biological and human health effects of extremely low frequency electromagnetic field : Arlington, VA. American Institute of Biological Science, 79-128, (1985).
 46. W.F. Krueger, "Influence of lower-level electric and magnetic fields on the growth of young children", *Biomedical scientific instrument*, **9** : 183-186, (1972).
 47. J.M.R. Delgado, "Embryological changes induced by weak, extremely low frequency electromagnetic fields", *J. of Anatomy*, **174** : 533-551, (1982).
 48. R.T. Portet and J. Cabanes, "Development of young rats and rabbits exposed to strong electric field", *Electromagnetics*, **9** : 95-104, (1988).
 49. D.I. Hilton and R.D. Phillips, "Cardiovascular response of rats exposed to 60Hz electric field", *Electromagnetics i*, 55-64, (1980).
 50. W.T. Kaune and R.D. Phillips, "Comparison of the coupling of grounded humans, swine and rats to vertical 60Hz electrical fields", *Bioelectromagnetics* **1**, 117-129, (1980).
 51. H.P. Schwan, "Field interaction with biological matter", *Ann. NY Acad. Sci.*, **103**, 178-213, (1977).
 52. M.E. Frazier, J.A. Reese, J.E. Morris, R.F. Jostes and D.L. Miller, "Exposure of mammalian cells to 60Hz magnetic field : analysis for DNA repair of induced, single-stranded breaks", *Electromagnetics* **11**, 227-234, (1990).
 53. H.W. Chung and Y.J. Kim, "The cytogenetic effect of extremely low frequency electromagnetic field on mammalian cells", *J. Institute Health Environ. Sci.*, **2**(2), 231-238, (1992).
 54. S.M. Nahas and H.A. Oraby, "Micronuclei formation in somatic cells of mice exposed to 50Hz electric field", *Environ. Mol. Mutatn.*, **13** : 107-111, (1989).
 55. R. Goodman, C.A.L. Bassett and A.S. Henderson, "Pulsing electromagnetic fields induce cellular transcription", *Science*, **220** : 1283-1285, (1983).
 56. S.M. Bawin, W.R. Adey, "Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak electric fields oscillating at low frequency", *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, **73**, 1999-2003,

- (1976).
57. S.D. Smith, R.R. McLeod, A.R. Liboff and K. Cooksey, "Calcium cyclotron response and diatom mobility", *Electromagnetics*, **8** : 215–227, (1987).
 58. R.A. Luben, C.D. Cain, M. Chen, D.M. Rosen and W.R. Adey, "Effects of electromagnetic stimuli on bone and bone cells in vitro : inhibition of response to parathyroid hormone by low-energy", low frequency fields, *Proc. Natl. Acad. Sci(USA)*, **79** : 4180–4184, (1982).
 59. W.R. Adey, "Joint actions of environmental nonionizing electromagnetic fields and chemical pollution in cancer promotion", *Environmental Health Perspectives*, **86** : 297–305, (1990).
 60. C.V. Byus, K. Kartun, S. Pieper and W.R. Adey, "Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol estertumor promoters", *Cancer Res.* **48** : 4222–4226, (1988).
 61. D.B. Lyle, P.Schechter, W.R. Adey and R.L. Lundak, "Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude modulated field", *Bioelectromagnetics*, **4** : 281–292, (1983).
 62. R.L. Davis, and S. Milham, "Altered immune status in aluminum reduction plant workers", *Am. J. Ind. Med.*, **18** : 79–85, (1990).
 63. M. Cohen, M. Lippmann, B. Chabner, "Role of the pineal gland in the aetiology and treatment of breast cancer", *Lancet*, **2** : 814–816, (1978).
 64. R.J. Reiter, L.E. Anderson, R.L. Buschbom and B.W. Wilson, "Reduction of the nocturnal rise in pineal melatonin levels in rats exposed to 60Hz electric fields in utero and for 23 days alter birth", *Life Sci.*, **42** : 2203–2206, (1988).
 65. International Non-ionizing Radiation Committee of the International Radiation Association, "Interim guideline on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz", *Health Physics*, **54**, 115–128, (1988).
 66. International Non-ionizing Radiation Committee of the International Radiation Association, "Interim guideline on limits of exposure to 50-60 Hz electric and magnetic field", *Health Physics* **58**, 1, 113–122, (1990).
 67. American conference of Environmental Industrial Hygienists, "1995–1996, Threshold limit value for chemical substances and physical agents and biological exposure indices", *ACGIH*, (1995).