

<Review Paper>

전자기파의 생체 위해성에 관한 소고

정 경 아¹ · 계 명 찬*

¹춘천교육대학교 실과교육과, 한양대학교 생명과학과

Biological Hazard of Electromagnetic Field Exposure: A Review

Kyung-Ah Jung¹ and Myung-Chan Gye*

¹Department of Practical Arts Education, Chuncheon National University of Education, Chuncheon, Korea

Department of Life Science and Institute for Natural Sciences, Hanyang University, Seoul, Korea

Abstract – The safety of human exposure to an ever-increasing number and diversity of electromagnetic field (EMF) sources both at work and at home has clearly become a public health issue. To date many *in vivo* and *in vitro* studies revealed that EMF exposure can alter cellular metabolism, endocrine function, immune activity, reproductive function, and fetal development in animal system. The major parameters found to be altered in cells or individuals following EMF exposure include an increase of free radicals, DNA damage, cancer risk, developmental defect, and reproductive dysfunctions. Epidemiological studies reported EMF can increase life-threatening illnesses such as leukemia, brain cancer, amyotrophic lateral sclerosis, clinical depression, suicide, and Alzheimer’s disease has been identified. These effects of EMF exposure differ according to duration of exposure, frequency of waves, and strength (energy) of EMF. In the present review, we briefly introduced the physical properties of EMF and summarized the effect of EMF on human and wildlife animals according to types of EMF, duration of exposure at cellular and organism levels.

Key words : electromagnetic field, biological hazard

서 론

현대 산업사회에서 전력의 생산과 공급, TV, 개인용 컴퓨터, 라디오 전파, 이동통신 등의 이용과정에서 전자기파(electromagnetic fields, EMF)가 발생한다. 1960년대 소련에서 전자기파의 위해성에 관한 연구를 효시로 전기, 전자기기와 휴대폰 사용증가에 따른 전자기파 노출빈도

의 증가에 따른 근로활동 및 일상생활 속에서 전자기파 노출에 따른 인체안정성 문제는 중요한 환경보건학적 이슈가 되고 있다. 본 소고에서는 인간보건학적 측면과 생태계에서 나타난 전자기파의 위해성을 정리하였다.

생활 전자기파의 종류와 노출빈도

현대인들은 다양한 종류의 전자기파에 노출된다. 첫 번째는 인간이 가장 빈번하게 노출되는 50~60 Hz 범위의 초저주파(extremely low frequency) 전자기파로, 산업과 가정용 전력선, 전기제품에서 발생한다. 3~30 kHz 주

* Corresponding author: Myung Chan Gye, Tel. 02-2220-0958, Fax. 02-2298-9646, E-mail. mcgye@hanyang.ac.kr

파수의 전자기파는 저주파 (very low frequency) 전자기파로서 컴퓨터모니터 또는 TV를 통해 나오는 전자기파다. 실제 TV나 개인용 PC에서 나오는 전자기파의 강도는 $6.25 \mu\text{T}$ 의 강도를 가지며 주파수는 20 kHz 정도이다 (Dawson *et al.* 1998). 다른 하나는 휴대폰, 가정용무선전화기, 방송 전송탑에서 발생하는 수백 MHz의 주파수를 갖는 라디오 전자기파 (radio frequency)이다. 이런 전자기파 모두 비전리 방사선으로 원자 주변 궤도에서 전자를 이탈시켜 원자를 이온화할 만큼 충분한 에너지를 갖지 않는다. 전자기파는 단파장일수록 파로서의 성질이 뚜렷해지며, 장파장일수록 자기장의 특성이 뚜렷해진다. 전기장은 kV m^{-1} 단위로 측정되고, 자기장은 μT 단위로 측정한다. 주택 내부와 외부에서 나타나는 전자기파의 범위는 $0.01 \sim 1 \mu\text{T}$ 정도이며, 가정용전기기구 사용과정에서 $4 \mu\text{T}$ 에 달하는 전자기파를 생성할 수 있다 (Hydro-Québec 1989). 저주파 전자기파의 강도는 전도체를 흐르는 전류의 강도와 전도체부터의 거리에 따라 다르게 나타난다. 따라서 초저주파 전자기파는 전력선 주변에서 가장 높으며 거리가 멀어질수록 급격히 감소한다.

전자기파 노출에 대해 과민한 전자기과민 (electromagnetic hypersensitivity, EHS) 증상이 보고되었다. EHS 증상을 호소하는 환자를 일반적으로 노출되기 쉬운 60 Hz, 300 V m^{-1} 초저주파 전자기파에 노출한 후 100초 뒤 통증, 두통, 근육경련, 부정맥이 유의적으로 증가하였고, 특히 전자기파가 켜지거나 꺼지는 동안에 심했다 (McCarty *et al.* 2011). 반면 CDMA (code-division multiple access) 방식 핸드폰에서 방출되는 초고주파 전자기파 노출에 대해 EHS군과 비EHS군을 비교연구한 결과 생리적 지표에 차이가 없었다 (Furubayashi *et al.* 2009; Nam *et al.* 2009). 사람들 간에는 특정 전자기파에 대해 증상에 차이가 있으며, 일반적인 EHS 증후를 갖는 사람도 있다. 이들은 불안감, 우울, 피로감, 스트레스 강도에 차이가 있다. 따라서 이들에게서 전자기파 노출은 더 통제되어야 할 것으로 이야기 되고 있다 (Johansson *et al.* 2010). 한편 전자기파에 노출된 아동들은 성인보다 더 민감한 반응을 보이는 데 수면장애, 기억력감소, 피로감, 혈액-뇌장벽의 손상, 뇌 신경세포의 변화 등을 보이고, 그 결과 뇌와 청각신경에서 암발생 위험성이 증가할 가능성이 지적되었다 (Grigor'ev 2005).

전자기파 노출에 따른 인체의 질병

수천 편의 논문들이 전자기파의 인체 위해성에 관한 리뷰를 제공한다. 많은 동물 및 세포를 이용한 실험에서 전자기파 노출에 따른 특정 생물학적 지표기능의 변화

가 있음이 보고되었다. 반면 전자기파 노출에 따른 인체 위해성에 관한 정보는 대부분은 역학조사를 통해 얻어진 것들이며 전자기파 노출에 대해 상반된 결과를 보고하고 있어 아직도 명쾌한 결론에 이르지 못하고 있다 (Brainard *et al.* 1999; Preece *et al.* 2000; BioInitiative report 2011). 현재까지의 보고된 전자기파의 위해성은 주파수, 전자기파형의 모양과 강도에 따라 생물학적 효과가 달리 나타날 수 있으며, 특정 조건의 전자기파 노출에 민감한 사람들이 있으며, 전자기파 노출 방법과 노출기간에 따라서도 다양한 독성 종말점에서 효과가 다르게 나타날 수 있으므로 전자기파가 인간에 무해하다거나 유해하다고 결론 짓기보다는 구체적으로 전자기파의 종류, 파형, 강도에 따라 적절한 위험표적 기능을 제시하고, 노출안전 기준을 설정하는 것이 필요하다. 전자기파 노출에 따른 인체질병 관련성에 관한 다양한 역학연구 결과 전자기파 노출이 생명을 위협하는 질병인 소아 및 성인성 백혈병 (Bastuji-Garin and Zittoun 1990; London *et al.* 1991), 성인뇌암 (Harrington *et al.* 1997), 루게릭병 (Lou Gehrig's disease, 근위축성측삭 경화증)과 같은 신경질환 (Johansen and Olsen 1998), 우울증 (Verkasalo *et al.* 1997), 자살 (Reichmanis *et al.* 1979), 알츠하이머 (Sobel *et al.* 1996) 등과 관련된다고 알려졌다. 최근 들어 전자기파에 의한 DNA 손상, 신경학적 문제 등과 같은 전자기파의 위해성은 국가, 국제적 안전규정보다 훨씬 더 낮은 농도에서도 발생하는 것으로 보고되었다. 바이오이니셔티브 보고서 (Bioinitiative Report, <http://www.bioinitiative.org/>)에서는 현재의 전자기파 노출에 대한 안전기준은 부적절하며 다양한 시험법에 기준한 새로운 안전기준이 필요한 것으로 제시하고 있다 (Johansson 2009).

전자기파의 세포 및 유전독성

다수의 *in vitro* 실험연구에서 전자기파 노출은 세포수준에서 다양한 변화를 유발한다 (Goodman *et al.* 1995; Santini *et al.* 2009). 유전독성은 DNA 상의 단일 또는 이중절단, 염색체결실, 소핵의 출현, 자매염색분체교환 (sister chromatid exchanges) 등을 종말점으로 분석된다. 단속적인 초저주파전자기파 노출의 유전독성 효과는 세포에 따라 다르게 나타난다. 50 Hz, 1 mT, 사인파형의 초저주파 전자기파에 1~24시간 노출한 사람의 섬유모세포와 멜라닌세포, 쥐의 과립세포에서 DNA에 단일 또는 이중절단이 일어나는 반면 사람의 림프구와 단핵구, 골격근세포 등에서는 유의적인 변화를 보이지 않았다. 이는 초저주파전자기파 노출에 따른 세포수준의 유전독성 효과가 세포특이적으로 발생함을 의미한다 (Ivancsits *et*

al. 2002; Ivancsits *et al.* 2005). 비록 50/60 Hz 전자기파는 직접적인 유전독성은 없으나 이러한 세포의 대사과정의 변화가 간접적으로 DNA의 구조적 변화를 초래할 수 있을 것으로 추측하고 있다. 반면 생쥐 림프종세포 및 햄스터 폐세포를 대상으로 핸드폰에서 발생하는 835 MHz의 라디오 전자기파의 유전독성에 대한 염기성 comet assay와 염색체결실 조사에서 유의적인 독성을 확인할 수 없었다. 다만 다른 종류의 유전독성 물질을 함께 처리한 경우 그 민감도는 전자기파 조사에 의해 증가하였으므로 (Kim *et al.* 2008) 라디오 전자기파의 잠재적 유해성은 재고되어야 할 것이다.

다양한 세포소기관, 세포 대사과정이 전자기파 노출에 의해 변화한다. 전자기파가 직접적으로 DNA 손상을 유발하지 않는 경우에도 전자기파 노출은 세포막에 변화를 유발하며, 유전자 발현과 신호전달 기작을 변화시키며, 세포증식과 세포주기, 세포분화 및 대사에도 영향을 미친다. 전자기파의 유전독성 효과는 미소열 발생에 따른 세포구조의 변화, 자유기 (free radicals) 형성, DNA 복구기작의 손상에 의한 것으로 알려졌다. 초저주파 전자기파 노출은 자유기 생성을 통해 다양한 세포반응을 활성화시켜 급성 및 만성적 효과를 나타낸다. 자유기는 미토콘드리아의 자연스런 대사산물이며, 전리방사선 (ionizing radiation) 또는 포볼 에스테르 (phorbol ester) 처리에 의해 증가하며, DNA의 불안정성을 증가시킨다. 전자기파에 의한 자유기의 세포 내 잔류기간의 증가는 만성적인 자유기의 농도상승을 유발한다. 일반적으로 자유기가 증가하면 DNA 손상 가능성이 증가하며 이로 인해 암발생 위험이 증가한다. 300 Hz 미만의 초저주파 전자기파에 만성적으로 노출되었을 때 나타나는 현상으로는 세포가 활성화되어 세포 내 Ca^{2+} 농도와 자유기 생성 및 존속기간이 증가하고, 이들을 제거하는 멜라토닌이 감소하여 반응성 산소종 (reactive oxygen species, ROS)이 증가한다 (Walleczek 1992; Walleczek 1994; Harkins and Grissom 1994; Roy *et al.* 1995). 특히 림프절과 줄기세포가 많은 골수에서 이러한 효과가 두드러지며, 그 결과 림프종, 백혈병, 유방암의 위험을 높인다 (Stevens *et al.* 1992). 한편 초저주파 전자기파에 단기간 노출되면, 대식세포에서 식세포 작용을 유발하고, 자유기를 생성한다. 대식세포와 같은 면역세포를 활성화하는 장점이 있으므로 치료목적으로 전자기파의 활용가능성이 있다 (Simko and Mattsson 2004). 전자기파 노출에 따른 효과는 상당 부분 열효과에 기인하는 것으로 알려졌다. 라디오 전자기파에 노출된 혈구세포에 대한 실험에서도 세포가 가열되지 않는 한 세포손상과 ROS 생성도 없는 것으로 나타났다 (Lantow *et al.* 2006). 휴대폰의 전자기파의 비가열

효과는 molecular chaperone을 유도하는데 이는 단백질의 변성이 일어나기 때문이다. 그 예로 핸드폰에서 방출되는 전자기파는 1.95 MHz에서 미오글로빈의 3차구조에 변화를 유발한다 (Mancinelli *et al.* 2004).

신경 및 행동학적 변화

초저주파 전자기파에 따른 신경 및 행동학적 변화로는 초저주파 전자기파에 조사된 쥐에서 모르핀에 의한 조건행동이 변화한다 (Lei *et al.* 2005). 사람에서는 전력선에서 발생하는 초저주파 전자기파 노출이 우울증 (Verkasalo *et al.* 1997) 및 자살충동과 관계되며 (Reichmanis *et al.* 1979), 전자기파에 빈번히 노출되는 작업자에서 알츠하이머병 위험이 증가하는 것으로 알려졌다 (Sobel *et al.* 1996). 37 Hz 초저주파 전자기파 노출은 사람에서 통각의 변화를 유발하는데 이 효과는 심혈관계의 비정상적 조절과 관계된 것으로 보고되었다 (Ghione *et al.* 2004). 핸드폰 및 데이터 전송에서 발생하는 초고주파 전자기파 및 마이크로웨이브 주파수의 전자기파 노출에 대한 우려가 증가하고 있다. 지난 10년간 핸드폰의 사용의 증가가 뇌암의 증가와 관련된 것으로 추측되고 있다. 현재 핸드폰 전자기파 노출 기준치는 미국이 1.6 W kg^{-1} , 유럽이 2 W kg^{-1} 로 정하고 있다. 라디오 주파수 전자기파 노출기준은 주로 열효과에 근거하여 제시되었으나 비열효과에 의한 전자기파노출 기준은 제시되고 있지 않아 향후 새로운 생물학적 위해성에 기준한 새로운 기준이 필요하다 (BioInitiative Report 2011).

전자기파의 심혈관계 독성

37 Hz 초저주파 전자기파는 심혈관계의 비정상적 조절을 유발한다 (Ghione *et al.* 2004). 반면 유의적인 열효과 또는 전류효과가 부과되지 않는다면 심혈관계는 직접적인 영향을 받지 않는다는 보고도 있는데 핸드폰에서 사용되는 초고주파 라디오 전자기파 노출은 혈압에 영향을 미치지 않는다 (Black and Heynick 2003). 오히려 약한 고혈압 증세가 있는 사람에서는 반복적인 초저주파 전자기파 노출이 혈압을 낮추는 효과가 있는 것으로 보고되었다 (Nishimura *et al.* 2011). 라디오 주파수 전자기파에 노출된 동물체를 대상으로 한 생애주기적 연구 결과 혈액학적 지표상에 전자기파 노출의 축적효과는 없는 것으로 나타났다 (Black and Heynick 2003).

전자기파의 내분비독성

전기의 사용에 따른 전자기파 노출과 송파선의 기능에 관한 많은 연구가 진행되었다 (Stevens *et al.* 1992). 아

직 논란의 여지는 있으나, 전자기파 노출은 빛과 함께 여러 동물 중에서 송과선 호르몬인 멜라토닌 분비에 영향을 미친다. 초저주파 전자기파에 지속적인 노출은 멜라토닌의 분비주기에 영향을 미친다(Reiter 1993). 전자기파 노출에 따른 멜라토닌의 변화와 유방암의 위험에 대해 고찰한 논문이 있다(Brainard *et al.* 1999). 원편광(circularly polarized)의 50 Hz 전자기파에 6주 동안 노출되었을 때 롱에반스(Long-Evans) 쥐의 송과선 및 혈중 멜라토닌 농도가 감소하였다(Kato *et al.* 1994). 60 Hz 전자기파에 4주 동안 하루에 16시간씩 노출된 쥐에서 혈중 멜라토닌, 프롤락틴 농도와 발정주기가 변화한다(Rodriguez *et al.* 2003, 2004). Djungarian hamster 성체의 경우 60Hz 전자기파에 급성노출되면 송과선에서 멜라토닌 생성과 혈중 농도에 영향을 미친다(Yellon 1994). 쥐의 골수에서 멜라토닌 농도가 매우 높다(Tan *et al.* 1999). 멜라토닌은 자유기를 제거하는 효과를 가지므로 산화적 손상을 줄이고, 면역증강제로 작동하여 암억제 효과를 갖는다. 초저주파 전자기파 노출은 송과선에 영향을 미쳐 멜라토닌의 생물학적 효과를 교란한다(Stevens and Davis 1996). 따라서 전자기파 노출에 의한 멜라토닌 감소는 암발생 위험성을 높일 수 있다. 멜라토닌은 시상하부에서 펄스형태로 분비되는 황체호르몬 분비호르몬 분비를 조절하여 여포자극호르몬, 황체호르몬과 같은 생식소자극호르몬의 분비에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 생식소자극호르몬의 변화는 생식소에서 생성되는 성스테로이드호르몬에도 영향을 미쳐 생식주기를 변화시킬 수 있다(Lincoln and Maeda 1992; Malpoux *et al.* 1993). 한편 60 Hz 초저주파 전자기파에 30 μT 강도로 24~27일간 노출된 쥐에서 프로그스테론 농도에는 변화가 없었으나 발정기가 단축되었다(Burchard *et al.* 1998). 라디오주파수 전자기파가 뇌하수체의 부신피질자극호르몬, 성장호르몬, 갑상선자극호르몬, 여포자극호르몬, 황체호르몬에 미치는 영향이 보고되었다. 이처럼 전자기파 노출에 의한 호르몬에 변화 원인의 대부분은 전자기파의 열 효과로 판명되었다. 반면 라디오주파수 전자기파에 장기간 노출에 따른 내분비계, 혈액학적, 면역학적 누적효과는 없는 것으로 나타났다(Black and Heynick 2003).

전자기파의 생식독성

전자기파 노출의 생식독성은 암수를 대상으로 다양한 독성종말점을 대상으로 연구가 진행되어 왔으며 최근 고찰되었다(Pourlis 2009). 기본적으로 생식기능은 신경계와 내분비계통에 의해 조절된다. 암컷 생쥐에서 신경내분비학적 변화가 노령화에 따른 생식기능 손실의 1차

적 원인으로 생각되고 있다(Tappa *et al.* 1989; Nelson *et al.* 1995). 최근 TV나 PC에서 나오는 20 kHz 톱니형 전자기파에 이유기 후 6주 동안 노출된 암컷 생쥐에서 발정주기의 도래간격을 길게 한다고 보고하였다(Jung *et al.* 2007). 이와 유사하게 60 Hz, 30 μT 의 전자기파 하루에 16시간 동안의 노출은 쥐에서 발정주기의 길이를 유의적으로 증가시켰다(Rodriguez *et al.* 2003). 이는 가임기 동안 전체배란 횟수를 감소시킬 수 있으므로 생식능력을 저하시키는 결과를 초래할 수 있다. 체외 배양된 생쥐 난포를 33 Hz 또는 50 Hz 초저주파 전자기파에 노출한 후 5일 후 다시 33 Hz 전자기파에 노출시킨 난포는 성장이 저해된 반면 50 Hz 전자기파 노출된 난포는 성장이 지속되었다. 또한 33 Hz 또는 50 Hz 초저주파 전자기파에 3일간 노출된 체외배양된 난포에서 난포발달이 저해된다(Cecconi *et al.* 2000). 따라서 난소 스테로이드에 조절 받는 발정주기가 태아 발달이나, 태아-모체간 상호작용 보다 더 민감한 것으로 사료되며, 여성의 전자기파 노출은 여성의 생식능력 교란을 초래할 가능성이 높은 것으로 사료된다. 이와는 반대로 암컷 쥐에서 10kHz, 0.2mT 사인파형 전자기파 노출이 발정주기에 미치는 영향이 없는 것으로 보고되어(Dawson *et al.* 1998) 발정주기에 미치는 전자기파의 영향은 주파수 및 에너지에 따라 다르게 나타나는 것으로 사료된다.

수컷 생쥐에서 60 Hz 전자기파 노출이 체중과 정소 중량에 유의적 변화를 초래하지는 않지만 생식세포의 사멸을 유의적으로 증가시키고 정상적인 세정관의 비율을 감소시켰다. 0.5 mT 전자기파에 노출된 경우 DNA 절편화 지표인 TUNEL-양성 생식세포가 정원세포에서 증가하였으나, 유세포 분석(flow cytometry) 결과 세포생존율에는 차이가 없었다(Lee *et al.* 2004). 사람의 운동성 좋은 정자를 라디오 전자기파인 900 MHz 핸드폰전자기파에 2.0 W kg⁻¹ 강도로 1시간 노출 시 침체반응에는 영향이 없었으나 정자 형태를 변화시키고, 정자와 핵스터난자의 반투명대(hemizona) 결합이 감소하여 라디오 전자기파가 정자의 수정능력을 감소시키는 것으로 나타났다(Falzone *et al.* 2011). 돼지 정자를 50 Hz 초저주파 전자기파 1시간 노출 시 0.5~1 mT 강도에서 침체에 손상을 유발하여 정자기능을 저해하고 수정율을 감소시켰다. *In vivo*에서는 1 mT 강도에서 정자기능을 감소시켰다. 또한 난관을 정자 없이 0.75 mT 이상의 전자기파에 노출하였을 때 수정란의 난할이 지연되어, 초기 배아 발달에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Bernabò *et al.* 2010). 토끼에서 50 Hz 초저주파 전자기파는 정자의 운동성을 변형시키고 사멸을 증가시켰다(Roychoudhury *et al.* 2009). 이와는 반대로 초저주파 전자기파 노출이 정자에 좋은 영

향을 미친다는 연구결과도 있다. 인간 정자를 50 Hz, 5 mT의 구형파(square wave) 초저주파 전자기파에 노출 시 운동성이 증가하였고, 전자기파 노출 처음 3시간 동안 유도된 그 효과는 21시간까지 지속되었다. 반면 50 Hz, 5 mT의 사인파형(sine wave) 전자기파 및 50 Hz, 2.5 mT 구형파 초저주파 전자기파 노출은 정자 운동성에 영향이 없었다. 따라서 초저주파 전자기파 노출은 정자의 운동성을 개선하며, 그 효과는 전자기파의 특성에 따라 달리 나타남을 알 수 있다(Iorio *et al.* 2007). 전자기파 노출의 차세대 독성과 관련하여 임신 쥐를 임신 6일부터 출생 후 21일까지 60 Hz, 500 μ T 초저주파 전자기파에 하루에 21시간 노출하였을 때 태어난 수컷의 정자형성과 생식능력에 변화가 없었다(Chung *et al.* 2005). 임신 13일부터 생후 21일까지 60 Hz, 1 mT 초저주파 전자기파에 노출된 수컷 쥐에서 세정관 직경과 면적, 세정관 상피의 높이, 세정관의 부피, 세정관 감소, 세정관상피의 부피, 레이디 세포(Leydig cell)이 감소한 반면 결합조직과 혈관의 증가하였고, 혈장 테스토스테론, 서톨리 세포, 세정관의 길이, 생식소-체중지수(gonadosomatic index)는 변화하지 않았다. 이러한 변화로부터 초저주파 전자기파에 임신기 노출은 정소발달에 영향을 미치는 것을 알 수 있다(Tenorio *et al.* 2011).

전자기파의 발생독성

전자기파 노출에 따른 발생독성은 다양한 독성종말점을 대상으로 연구가 진행되어 왔으며 최근 고찰되었다(Pourlis 2009). 선행연구들에서 모체나 임신기 태아에 전자기파 노출에 따른 위해성에 관한 보고들이 있다(Dawson *et al.* 1998). 임신기 동안 모니터 작업의 영향에 따른 자연 유산율과의 상관성에 관한 많은 연구결과가 있다(Goldhaber *et al.* 1988; McDonald *et al.* 1988; Schnorr *et al.* 1991). 사무실에 근무하는 임신여성에서 조사된 출생장애와 유산에 관한 역학조사 결과는 모니터에서 나오는 전자기파 노출이 사람의 생식에 부정적 영향이 있는 것으로 보고 하였으나(Bergvist 1984; Goldhaber *et al.* 1988), 이러한 효과를 실험적으로 규명하지는 못했다(Bryant and Love 1989). 반면 임신하지 않은 젊은 여성에서 전자기파노출의 생식위해성에 관한 연구는 거의 수행되지 않고 있다.

착상과 태아 발달에 미치는 영향에 관한 연구결과 임신 생쥐를 임신 0~17일 사이에 50 Hz, 20 mT 사인파형 전자기파에 임신 첫날부터 17일째까지 노출한 경우 착상 전 후 배아생존율, 성비, 발생기형에 유의적인 변화가 없었다. 그러나 전자기파 노출은 키가 크고 무거운 새끼

의 출생을 유발하였다(Kowalczyk *et al.* 1994). 50 Hz, 사인파형 전자기파를 5.0 mT 강도로 교미 이전에 수컷과 암컷에 각각 9주와 2주간 조사한 이후에도 이들의 생식기능과 태아의 발생에 영향이 없는 것으로 보고되었다(Ohnishi *et al.* 2002). 임신기 중 20 kHz 톱니형 6.5 μ T 전자기파에 하루 8시간 동안 노출은 생쥐 태아에 기형을 유발하지 않는 것으로 보고되었다(Kim *et al.* 2004).

전자기파의 면역독성

지속적인 전자기파 노출은 면역세포 특히 대식세포와 체장 림프구의 기능적 지표를 변화시키고, 흉선세포의 사멸을 유발한다(Flipo *et al.* 1998). 전자기파는 다양한 알레르기 및 염증반응을 조절하여 면역기능과 조직재생에 영향을 미친다. 이러한 교란은 암 등 여러 질병과 연관된다. 대식세포에서 전자기파에 단기노출 시 식세포작용을 활성화하고, 자유기를 생성하는데 이 효과는 면역계에서 긍정적 효과를 갖는다. 사람의 림프구와 단핵구를 대상으로 1950 MHz, 1 mW g^{-1} 전자기파를 단속적 모드(5분 노출 후 10분 정지)에서 온도변화는 0.06°C 이내에서 8시간 조사한 결과 림프구에서 인터루킨 2(interleukin 2, IL2), 인터페론 감마(interferon gamma, INF- γ)의 생성과 단핵구에서 IL-1과 종양괴사인자알파(tumor necrosis factor alpha, TNF- α)의 생성, 면역조절 유전자인 IL-1 α , IL-1 β , IL-2, IL-2 수용체, IL-4, 과립세포 대식세포 집락자극인자(granulocyte macrophage colony stimulating factor, GM-CSF), 대식세포집락자극인자(macrophage colony stimulating factor, MCSF) 수용체, TNF- α , TNF- α 수용체의 발현, LAK 세포(lymphokine activated killer cell)의 암세포 사멸활성에 유의적인 차이가 없었다(Tuschl *et al.* 2006). 1750~2750 MHz, 100~500 W cm^{-2} 의 라디오 전자기파는 항체단백질에 변형시키고 자가면역질환을 증가시킨다(Grigor'ev *et al.* 2003).

전자기파의 생태계 위해성

전자기파에 노출된 동물들에서 활동, 공간지각, 조건반사 행동의 변화 등과 같은 행동학적 변화들이 관찰된다. 곤충, 조류, 파충류와 같은 동물들은 이동에 필요한 공간지각에 전자기파를 이용한다(Grigor'ev *et al.* 2003). 따라서 이들 동물들은 전자기파 노출에 의해 행동에 교란을 겪을 개연성이 높을 것으로 추측되고 있다. 반면 국내에서 사육하는 야생동물에서 전자기파의 위해성에 관한 연구는 시행되고 있지 않으므로 향후 이에 대한 구체적인 위해성정보의 획득과 관리방안이 요구된다.

곤충류

전자기파 노출은 곤충의 발생, 번식, 생리에 영향을 미친다 (Greenberg *et al.* 1981). 휴대폰에서 발생하는 전자기파는 초파리의 MAPK (mitogen activated protein kinase) 신호전달을 변형시키고 (Lee *et al.* 2008), 마이크로 주파수 전자기파는 초파리의 발생에 영향을 미친다 (Atli and Unlü 2006).

어류

제브라피시 (*Danio rerio*) 배아를 50 Hz 전자기파에 수정 후 48시간부터 노출시켰을 때 부화가 유의하게 지연되었다 (Skauli *et al.* 2000).

양서류

50 Hz 전자기파에 노출된 양서류 낭배시기 배아의 세포질 내 Ca²⁺ 농도가 상승하고, 형태형성에 필요한 세포 이동이 증가한다 (Komazaki and Takano 2007). 양서류 적혈구를 체외에서 초고주파 전자기파에 40분 동안 노출시켰을 때 DNA 손상이 증가한다 (Chemeris *et al.* 2004).

파충류

아가마도마뱀 (*Pogona vitticeps*)을 6~8 Hz, 2.6 μT, 10

V m⁻¹의 사인파형 초저주파전자기파에 주간 하루 12시간 노출하였을 때 꼬리를 드는 반응을 보인다. 두정부의 눈을 가려 빛을 차단했을 때 꼬리를 드는 전자기파에 반응행동이 사라졌다 (Nishimura *et al.* 2010). 이러한 특징은 이 도마뱀을 전자기파에 대한 생물행동 반응모델로 사용할 수 있는 가능성을 시사한다.

조류

전력선에서 나오는 전자기파가 조류의 생식과 생리에 미치는 영향에 관해 조사되었다 (Ferne and Reynolds 2005). 조류는 전력선에 가장 근접하여 서식하는 특성을 가지며 따라서 전자기파에 쉽게 노출된다. 특히 많은 종류의 조류가 전력송신탑에 둥지를 틀고 있어 보통 3년에 걸쳐 연 3개월 동안의 번식기 동안 전자기파에 노출된다. 짝짓기부터 새끼가 둥지를 떠날 때까지 95일간 전자기파에 노출되는 올빼미의 경우 코르티코스테론 (corticosterone) 농도가 운동성을 증가시켰다 (Dufty and Beltoff 1997). 초저주파 전자기파에 노출되면 교미행동이 더 왕성해진다. 이때 전자기파에 노출된 수컷이 활성화되는데 반해 암컷은 별 영향을 받지 않는다. 이러한 행동의 변화는 내분비학적 변화에 따른 것으로 추측하고 있다. 또한 전자기파에 노출된 암컷은 새끼를 키우는 동안 둥지와 새끼를 돌보는 시간이 감소하게 되므로 성공적인 번식에 장애요인이 될 수 있다. 전자기파 노출에

Frequency	Type	Usage	Biological effects
30 GHz	SHF	Satellite broadcasting	Human-autoimmune disease (1750-2750 MHz, 100-500 W/cm ²)
3 GHz	UHF	Cellphone	Human-decreased fertility of sperm (900 MHz, 2.0 W/Kg)
300 MHz	VHF	Amateur radio	Mammal-increased sensitivity to genotoxic chemical (835 MHz)
30 MHz	HF	AM radio	Bird-increased embryonic lethality (GSM)
3 MHz	UW		Insect-altered early development (cellphone)
30 KHz	UW		Mammal-delayed estrus cycle, decreased fertility (20 KHz, sawtooth)
20 KHz	VLF	PC monitor, TV	Human-increased arrhythmia in EHS patient (60 Hz, 300 V/m)
	ULF		Human-DNA damage in melanin, fibrous cell (50 Hz, 1 mT, sinusoidal)
30 Hz	SLF	Common electrical goods	Human-hyperalgesia by cardiovascular disorder (37 Hz)
	ELF		Mammal-decreased blood melatonin level (50-60 Hz)
			Mammal-Follicle and antrum follicle dysplasia(33, 50 Hz)
			Mammal-apoptosis in male germ cell (60 Hz, 0.5 mT)
			Mammal-delayed development of testis (60 Hz, 1 mT)
			Mammal-delivery of relatively big pup (50 Hz, 20 mT, sinusoidal)
			Mammal-altered motility of sperm (50 Hz)
			Bird-increased copulatory behavior of male (60 Hz)
			Frog-increased Ca ²⁺ level in gastrula cytosol (50 Hz)
			Fish, Bird-altered hatching rate (50, 60 Hz)
3 Hz			Reptile-altered behavior (6-8 Hz, 2.6 μT, 10 V/m)

Fig. 1. Summary of biological hazards of electromagnetic field. SHF, super high frequency; UHF, ultra high frequency; VHF, very high frequency; HF, high frequency; UW, ultrasonic wave; VLF, very low frequency; ULF, ultra low frequency; SLF, super low frequency; ELF, extremely low frequency; GSM, global system for mobile communication.

다른 행동학적 변화는 전력선 근처에 자주 출몰하는 독립생활 조류에서도 나타난다. 황조롱이에서 전자기파 노출은 수정율, 난자의 크기, 성장한 새끼가 등지를 떠나는 이소율, 배아발달을 증가시키는 반면 난자의 두께와 부화율은 유의적으로 감소시킨다(Fernie *et al.* 2000). 닭(*Gallus domesticus* L.) 배아를 컴퓨터와 TV에서 나오는 전자기파에 야생 조류가 실제 노출될 수 있는 것보다 낮은 수준에서 배아시기에 지속적으로 노출시킨 결과 배아사멸이 유의적으로 증가하였다(Youbicier-Simo *et al.* 1997). 100 Hz 전자기파를 대상으로 검색한 결과 단극성 구형전자파는 0.1 A m^{-1} 에서, 양극성 진동(oscillations) 전자기파에는 1 A m^{-1} 이상의 강도에서 배아발달 초기 48시간 동안 노출시 비정상적 발생이 증가하였다(Juutilainen and Saali 1986). 유럽 및 기타 지역에서 광범위하게 사용되는 디지털 이동전화 시스템인 GSM (Global System for Mobile communication) 핸드폰 전자기파에 발생 21일차 계배를 노출하였을 때 배아 사멸율이 대조군보다 월등히 높았다(Grigor'ev 2003).

결론 및 제언

본 소고에서 전자기파의 종류, 세포와 사람과 야생동물에서 생체기능에 미치는 전자기파의 영향을 정리하였다. 체외 및 체내실험 결과에서 전자기파노출이 세포대사, 내분비, 면역, 신경, 생식, 태아발달을 저해하며, 이러한 교란효과는 주파수, 노출기간, 강도(에너지)에 따라 다르다. 전자기파는 야생 무척추동물과 척추동물에서도 번식과 다양한 생리기능을 변화시킨다(Fig. 1). 일상생활과 직업환경 속에서 다양한 종류의 전자기파에 노출되는 현대인들은 전자기파노출의 생체위해성에 대한 인식과 회피노력, 전자기파로부터 방호할 수 있는 소재기술의 개발이 요구된다. 또한 야생동물의 서식지 환경에서 발생하는 전자기파의 위해성에 관한 정보와 방호대책에 대한 연구개발이 필요할 것이다.

적 요

현대인들은 가정생활과 직업환경 속에서 다양한 종류의 전자기파에 노출되며 전자기파 노출에 따른 생체위해성은 공중보건학적으로 중요한 이슈로 대두되었다. 현재까지 많은 체외 및 체내실험 결과에서 전자기파 노출이 세포대사, 내분비, 면역, 신경, 생식, 태아발달에 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 세포나 개체 수준에서 시

행된 실험연구에서는 전자기파 노출에 의해 세포내부 자유기의 증가, DNA 손상과 암발생, 발생기형, 생식기능 저하가 나타난다. 역학조사결과 전자기파 노출은 생명을 위협하는 질병인 백혈병, 뇌암, 근위축성 측삭경화증, 우울증, 자살, 알츠하이머와 상관성이 보고되었다. 이러한 생체기능 변화는 전자기파의 주파수, 노출기간, 강도(에너지)에 따라 다르게 나타난다. 전자기파 노출은 곤충, 어류, 양서류, 파충류, 조류 등 야생동물에서도 동물행동, 번식, 생리기능의 변화를 초래한다. 본 소고에서는 인간 보건학적 측면과 생태계에서 나타난 전자기파의 위해성을 전자기파의 종류, 노출시간에 따라 세포 및 개체 수준에서 보고된 위해성 자료를 정리하였다.

참 고 문 헌

- Atli E and H Unlü. 2006. The effects of microwave frequency electromagnetic fields on the development of *Drosophila melanogaster*. *Int. J. Radiat. Biol.* 82:435-441.
- Bastuji-Garin SR and R Zittoun. 1990. Acute leukemia in workers exposed to electromagnetic fields. *Eur. J. Cancer* 26: 1119-1120.
- Bergqvist UO. 1984. Video display terminals and health: A technical and medical appraisal of the state of the art. *Scand. J. Work Environ. Health* 10:1-87.
- Bernabò N, E Tettamanti, V Russo, A Martelli, M Turriani, M Mattoli and B Barboni. 2010. Extremely low frequency electromagnetic field exposure affects fertilization outcome in swine animal model. *Theriogenology* 73:1293-1305.
- BioInitiative report: a rationale for a biologically-based public exposure standard for electromagnetic fields (ELF and RF). <http://www.bioinitiative.org> [Updated April 26, 2011].
- Black DR and LN Heynick. 2003. Radiofrequency (RF) effects on blood cells, cardiac, endocrine, and immunological functions. *Bioelectromagnetics Suppl.* 6:S187-195.
- Brainard GC, R Kavet and LI Kheifets. 1999. The relationship between electromagnetic field and light exposures to melatonin and breast cancer risk: A review of the relevant literature. *J. Pineal Res.* 26:65-100.
- Bryant HE and EJ Love. 1989. Video display terminal use and spontaneous abortion risk. *Int. J. Epidemiol.* 18:132-138.
- Burchard JF, DH Nguyen and E Block. 1998. Progesterone concentrations during estrous cycle of dairy cows exposed to electric and magnetic fields. *Bioelectromagnetics* 19:438-443.
- Cecconi S, G Gualtieri, A Di Bartolomeo, G Troian, MG Cifone and R Canipari. 2000. Evaluation of the effects of extremely low frequency electromagnetic fields on mammalian follicle

- development. *Hum. Reprod.* 15:2319-2325.
- Chemeris NK, AB Gapeyev, NP Sirota, OY Gudkova, NV Kornienko, AV Tankanag, IV Konovalov, ME Buzoverya, VG Suvorov and VA Logunov. 2004. DNA damage in frog erythrocytes after in vitro exposure to a high peak-power pulsed electromagnetic field. *Mut. Res.* 558:27-34.
- Chung MK, SJ Lee, YB Kim, SC Park, DH Shin, SH Kim and Kim JC. 2005. Evaluation of spermatogenesis and fertility in F1 male rats after in utero and neonatal exposure to extremely low frequency electromagnetic fields. *Asian J. Androl.* 7:189-194.
- Dawson BV, IG Robertson, WR Wilson, LJ Zwi, JT Boys and AW Green. 1998. Evaluation of potential health effects of 10 kHz magnetic fields: A rodent reproductive study. *Bioelectromagnetics* 19:162-171.
- Dufty AM and JR Belthoff. 1997. Corticosterone and the stress response in young western screech-owls: effects of captivity, gender, and activity period. *Physiol. Zool.* 70:143-149.
- Falzone N, C Huyser, P Becker, D Leszczynski and DR Franken. 2011. The effect of pulsed 900-MHz GSM mobile phone radiation on the acrosome reaction, head morphometry and zona binding of human spermatozoa. *Int. J. Androl.* 34:20-26.
- Fernie KJ, DM Bird and RD Dawson. 2000. Effects of electromagnetic fields on the reproductive success of American kestrels. *Physiol. Biochem. Zool.* 73:60-65.
- Fernie KJ and SJ Reynolds. 2005. The effects of electromagnetic fields from power lines on avian reproductive biology and physiology: a review. *J. Toxicol. Environ. Health B. Crit. Rev.* 8:127-140.
- Flipo D, M Fournier, C Benquet, P Roux, C Le Boulaire, C Pinsky, FS LaBella and K Krzystyniak. 1998. Increased apoptosis, changes in intracellular Ca^{2+} , and functional alterations in lymphocytes and macrophages after in vitro exposure to static magnetic field. *J Toxicol Environ, Health* 54:63-76.
- Furubayashi T, A Ushiyama, Y Terao, Y Mizuno, K Shirasawa, P Pongpaibool, AY Simba, K Wake, M Nishikawa and K Miyawaki. 2009. Effects of short-term W-CDMA mobile phone base station exposure on women with or without mobile phone related symptoms. *Bioelectromagnetics* 30: 100-113.
- Ghione S, C Del Seppia, L Mezzasalma, M Emdin and P Luschi. 2004. Human head exposure to a 37 Hz electromagnetic field: effects on blood pressure, somatosensory perception, and related parameters. *Bioelectromagnetics* 25:167-175.
- Goldhaber MK, MR Polen and RA Hiatt. 1988. The risk of miscarriage and birth defects among women who use video display terminals during pregnancy. *Am. J. Ind. Med.* 13: 695-706.
- Goodman EM, B Greenebaum and MT Marron. 1995. Effects of electromagnetic fields on molecules and cells. *Int. Rev. Cytol.* 158:279-338.
- Greenberg B, VP Bindokas and JR Gaujer. 1981. Biological effects of a 760 kV transmission line: Exposures and thresholds in honeybee colonies. *Bioelectromagnetics* 2:315.
- Grigor'ev IuG. 2003. Biological effects of mobile phone electromagnetic field on chick embryo (risk assessment using the mortality rate). *Radiats. Biol. Radioecol.* 43:541-543.
- Grigor'ev IuG. 2005. The electromagnetic fields of cellular phones and the health of children and of teenagers (the situation requiring to take an urgent measure). *Radiats. Biol. Radioecol.* 45:442-450.
- Grigor'ev IuG, AV Shafirkin and AL Vasin. 2003. Bioeffects of chronic exposure to radiofrequency electromagnetic fields of low intensity (standardization strategy). *Radiats. Biol. Radioecol.* 43:501-511.
- Grigor'ev OA, EP Bicheldeĭ and AV Merkulov. 2003. Anthropogenic EMF effects on the condition and function of natural ecosystems. *Radiats. Biol. Radioecol.* 43:544-551.
- Harkins TT and CB Grissom. 1994. Magnetic field effects on B12 ethanolamine ammonia lyase: Evidence for a radical mechanism. *Science* 263:958-960.
- Harrington JM, DI McBride, T Sorahan, GM Paddle and M van Tongeren. 1997. Occupational exposure to magnetic fields in relation to mortality from brain cancer among electricity generation and transmission workers. *Occup. Environ. Med.* 54:7-13.
- Hydro-Québec. 1989. Electricity in the air. Montreal, PQ: Hydro-Québec.
- Iorio R, R Scrimaglio, E Rantucci, S Delle Monache, A Di Gaetano, N Finetti, F Francavilla, R Santucci, E Tettamanti and R Colonna. 2007. A preliminary study of oscillating electromagnetic field effects on human spermatozoon motility. *Bioelectromagnetics* 28:72-75.
- Ivancsits S, A Pilger, E Diem, O Jahn and HW Rudiger. 2005. Cell type-specific genotoxic effects of intermittent extremely low-frequency electromagnetic fields. *Mutat. Res.* 583: 184-188.
- Ivancsits S, E Diem, A Pilger, HW Rudiger and O Jahn. 2002. Induction of DNA strand breaks by intermittent exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields in human diploid fibroblasts. *Mutat. Res.* 519:1-13.
- Johansen C and J Olsen. 1998. Mortality from amyotrophic lateral sclerosis, other chronic disorders and electric shocks among utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 148:362-368.
- Johansson A, S Nordin, M Heiden and M Sandström. 2010. Symptoms, personality traits, and stress in people with mobile phone-related symptoms and electromagnetic hypersensitivity. *J. Psychosom. Res.* 68:37-45.

- Johansson O. 2009. Disturbance of the immune system by electromagnetic fields-A potentially underlying cause for cellular damage and tissue repair reduction which could lead to disease and impairment. *Pathophysiology* 16:157-177.
- Jung KA, HS Ahn, YS Lee and MC Gye. 2007. Effect of a 20 kHz sawtooth magnetic field exposure on the estrous cycle in mice. *J. Microbiol. Biotechnol.* 17:398-402.
- Juutilainen J and K Saali. 1986. Development of chick embryos in 1 Hz to 100 kHz magnetic fields. *Radiat. Environ. Biophys.* 25:135-140.
- Kato M, K Honma, T Shigemitsu and Y Shiga. 1994. Circularly polarized 50-Hz magnetic field exposure reduces pineal gland and blood melatonin concentrations of Long-Evans rats. *Neurosci. Lett.* 166: 59-62.
- Kim JY, SY Hong, YM Lee, SA Yu, WS Koh, JR Hong, T Son, SK Chang and M Lee. 2008. In vitro assessment of clastogenicity of mobile-phone radiation (835 MHz) using the alkaline comet assay and chromosomal aberration test. *Environ. Toxicol.* 23:319-327.
- Kim SH, JE Song, SR Kim, H Oh, YM Gimm, D Yoo, JK Pack and YS Lee. 2004. Teratological studies of prenatal exposure of mice to a 20 kHz sawtooth magnetic field. *Bioelectromagnetics* 25:114-117.
- Komazaki S and K Takano. 2007. Induction of increase in intracellular calcium concentration of embryonic cells and acceleration of morphogenetic cell movements during amphibian gastrulation by a 50-Hz magnetic field. *J. Exp. Zool. A. Ecol. Genet. Physiol.* 307:156-162.
- Kowalczyk CL, L Robins, BK Butland, JM Thomas and RD Saunders. 1994. Effects of prenatal exposure to 50 Hz magnetic fields on development in mice: 1. Implantation rate and fetal development. *Bioelectromagnetics* 15:349-361.
- Lantow M, J Schuderer, C Hartwig and M Simkó. 2006. Free radical release and HSP70 expression in two human immune-relevant cell lines after exposure to 1800 MHz radiofrequency radiation. *Radiat. Res.* 165:88-94.
- Lee JS, SS Ahn, KC Jung, YW Kim and SK Lee. 2004. Effects of 60 Hz electromagnetic field exposure on testicular germ cell apoptosis in mice. *Asian J. Androl.* 6:29-34.
- Lee KS, JS Choi, SY Hong, TH Son and K Yu. 2008. Mobile phone electromagnetic radiation activates MAPK signaling and regulates viability in *Drosophila*. *Bioelectromagnetics* 29:371-379.
- Lei Y, T Liu, FA Wilson, D Zhou, Y Ma and X Hu. 2005. Effects of extremely low-frequency electromagnetic fields on morphine-induced conditioned place preferences in rats. *Neurosci. Lett.* 390:72-75.
- Lincoln GA and KI Maeda. 1992. Reproductive effects of placing microimplants of melatonin in the mediobasal hypothalamus and preoptic area in rams. *J. Endocrinol.* 132:201-215.
- London SJ, DC Thomas, JD Bowman, E Sobel and JM Peters. 1991. Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.* 134:923-937.
- Malpoux B, A Daveau, F Maurice, V Gayrard and JC Thiery. 1993. Short days effects of melatonin on luteinizing hormone secretion in the ewe: evidence for central sites of action in the mediobasal hypothalamus. *Biol. Reprod.* 48:752-760.
- Mancinelli F, M Caraglia, A Abbruzzese, G d'Ambrosio, R Massa and E Bismuto. 2004. Non-thermal effects of electromagnetic fields at mobile phone frequency on the refolding of an intracellular protein: myoglobin. *J. Cell Biochem.* 93: 188-196.
- McCarty DE, S Carrubba, AL Chesson, C Frilot, E Gonzalez-Toledo and AA Marino. 2011. Electromagnetic hypersensitivity: evidence for a novel neurological syndrome. *Int. J. Neurosci.* 121:670-676.
- McDonald AC, JC McDonald, B Armstrong, N Cherry, AD Nolin and D Robert. 1988. Work with visual display units during pregnancy. *Br. J. Ind. Med.* 45:509-515.
- Nam KC, JH Lee, HW Noh, EJ Cha, NH Kim and DW Kim. 2009. Hypersensitivity to RF fields emitted from CDMA cellular phones: a provocation study. *Bioelectromagnetics* 30:641-650.
- National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS). 1998. Working group report: Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. In: Portier CJ, Wolfe MS, editors. US National Institutes of Health. NIH Publication No. 98-3981. Research Triangle Park: NIEHS .
- Nelson JF, L Karelus, MD Bergman and LS Felicio. 1995. Neuroendocrine involvement in aging: evidence from studies of reproductive aging and caloric restriction. *Neurobiol. Aging* 16:837-843.
- Nishimura T, H Okano, H Tada, E Nishimura, K Sugimoto, K Mohri and M Fukushima. 2010. Lizards respond to an extremely low-frequency electromagnetic field. *J. Exp. Biol.* 213 (Pt 12):1985-1990.
- Nishimura T, H Tada, X Guo, T Murayama, S Teramukai, H Okano, J Yamada, K Mohri and M Fukushima. 2011. 1- μ T extremely low-frequency electromagnetic field vs. sham control for mild-to-moderate hypertension: a double-blind, randomized study. *Hypertens. Res.* 34:372-377.
- Ohnishi Y, F Mizuno, T Sato, M Yasui, T Kikuchi and M Oga-wa. 2002. Effects of power frequency alternating magnetic fields on reproduction and pre-natal development of mice. *J. Toxicol. Sci.* 27:131-138.
- Pourlis AF. 2009. Reproductive and developmental effects of EMF in vertebrate animal models. *Pathophysiology* 16:179-189.

- Preece AW, JW Hand, RN Clarke and A Stewart. 2000. Power frequency electromagnetic fields and health. Where's the evidence? *Phys. Med. Biol.* 45:R139-154.
- Reichmanis M, FS Perry, AA Marino and RO Becker. 1979. Relation between suicide and the electromagnetic field of verhead power lines. *Physiol. Chem. Phys.* 11:395-403.
- Reiter RJ. 1993. Static and extremely low frequency electromagnetic field exposure reported effects on the circadian production of melatonin (review). *J. Cell. Biochem.* 51:394-403.
- Rodriguez M, D Petitclerc, JF Burchard, DH Nguyen and E Block. 2004. Blood melatonin and prolactin concentrations in dairy cows exposed to 60 Hz electric and magnetic fields during 8 h photoperiods. *Bioelectromagnetics* 25:508-515.
- Rodriguez M, D Petitclerc, JF Burchard, DH Nguyen, E Block and BR Downey. 2003. Response of the estrous cycle in dairy cows exposed to electric and magnetic fields (60 Hz) during 8-h photoperiods. *Anim. Reprod. Sci.* 99:11-20.
- Roy S, Y Noda, V Eckert, MG Traber, A Mori, RP Liburdy and L Packer. 1995. The phorbol 12-myristate 13-acetate (PMA)-induced oxidative burst in rat peritoneal neutrophils is increased by a 0.1 mT (60 Hz) magnetic field. *FEBS Lett.* 376:164-166.
- Roychoudhury S, J Jedlicka, V Parkanyi, J Rafay, L Ondruska, P Massanyi and J Bulla. 2009. Influence of a 50 hz extra low frequency electromagnetic field on spermatozoa motility and fertilization rates in rabbits. *J. Environ. Sci. Health A. Tox. Hazard Subst. Environ. Eng.* 44:1041-1047.
- Santini MT, G Rainaldi and PL Indovina. 2009. Cellular effects of extremely low frequency (ELF) electromagnetic fields. *Int. J. Radiat. Biol.* 85:294-313.
- Schnorr T, B Grajewski, R Hornung, MJ Thun, G Egeland, W Murray, D Conover and W Halperin. 1991. Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. *N. Engl. J. Med.* 324:727-733.
- Simkó M and MO Mattsson. 2004. Extremely low frequency electromagnetic fields as effectors of cellular responses in vitro: possible immune cell activation. *J. Cell Biochem.* 93:83-92.
- Skauli KS, JB Reitan and BT Walther. 2000. Hatching in zebrafish (*Danio rerio*) embryos exposed to a 50 Hz magnetic field. *Bioelectromagnetics* 21:407-417.
- Sobel E, M Dunn, Z Davanipour, Z Qian and HC Chui. 1996. Elevated risk of Alzheimer's disease among workers with likely electromagnetic field exposure. *Neurology* 47:1477-1481.
- Stevens RG and S Davis. 1996. The melatonin hypothesis: Electric power and breast cancer. *Environ. Health Perspect.* 104(Suppl 1):135-140.
- Stevens RG, S Davis, DB Thomas, LE Anderson and BW Wilson. 1992. Electric power, pineal function, and the risk of breast cancer. *FASEB J.* 6:853-860.
- Tan DX, LC Manchester, RJ Reiter, WB Qi, M Zhang, ST Weintraub, J Cabrera, RM Sainz and JC Mayo. 1999. Identification of highly elevated levels of melatonin in bone marrow: Its origin and significance. *Biochim. Biophys. Acta.* 1472:206-214.
- Tappa B, H Amao, A Ogasa and KW Takahashi. 1989. Changes in the estrous cycle and number of ovulated and fertilized ova in aging female IVCS mice. *Exp. Anim.* 38:115-119.
- Tenorio BM, GC Jimenez, RN Morais, SM Torres, R Albuquerque Nogueira and VA Silva Junior. 2011. Testicular development evaluation in rats exposed to 60 Hz and 1 mT electromagnetic field. *J. Appl. Toxicol.* 31:223-230.
- Tuschl H, W Novak and H Molla-Djafari. 2006. In vitro effects of GSM modulated radiofrequency fields on human immune cells. *Bioelectromagnetics* 27:188-196.
- Verkasalo PK, J Kaprio, J Varjonen, K Romanov, K Heikkila and M Koskenvuo. 1997. Magnetic fields of transmission lines and depression. *Am. J. Epidemiol.* 146:1037-1045.
- Walleczek J. 1992. Electromagnetic field effects on cells of the immune system: The role of calcium signalling, *FASEB J.* 6:3177-3185.
- Walleczek J. 1994. Immune cell interactions with extremely low frequency magnetic fields: experimental verification and mechanisms. In *On the nature of electromagnetic field interactions with biological systems*, ed. AH Frey, pp. 167-180. Austin, TX: R. G. Landes.
- Yellon SM. 1994. Acute 60 Hz magnetic field exposure effects on the melatonin rhythm in the pineal gland and circulation of the adult Djungarian hamster. *J. Pineal Res.* 16:136-144.
- Youbicier-Simo BJ, F Boudard, C Cabaner and M Bastide. 1997. Biological effects of continuous exposure of embryos and young chickens to electromagnetic fields emitted by video display units. *Bioelectromagnetics* 18:514-523.