

전자파의 노출속에서 성장 및 노화된 생쥐와 그의 2세대에서 나타난 특징

한림대학교 의과학연구소 및 단국대학교 전자공학과*

김 윤 원, 이 진 상, 조 자 연, 김 윤 명*

1. 서 론

전기를 생산하거나 공급 또는 소비하는 모든 과정에서는 필연적으로 전기장과 자기장이 발생된다. 현대인은 번개, 지자기 등 자연전자계와 전력설비, 방송국, 중계국, 휴대폰, 가정용전기용품기기 등 가정용 생활기기 또는 공공설비에서 발생하는 전자계 속에서 생활하고 있으며, 환경문제의 일환으로써 전자계가 생물에 미치는 영향이 커다란 문제로 대두되고 있다. 전자파의 유해성이 널리 확산된 분위기에서, 우리나라에서도 1980년대 초부터 전자장의 인체 안전에 대한 위해 가능성이 알려지면서 이의 홍보를 위하여 의공학 및 환경분야에서 선구적으로 열심히 노력한 몇 분들이 있다. 그들은 주로 전자장 환경 측정을 행하고, 그 결과들을 국제 안전기준과 비교함으로써, 국민들에게 전자장 환경의 위험 가능성을 인식시키고자 하였으며, 이에 따라 전자장의 인체 유해 가능성은 국민적 관심사가 되었다.

현재 전자파의 노출이 인체건강에 미치는 효과에 관한 구미 각국에서의 연구는 특히 전력선주파수(50-60Hz)인 극저주파의 자기장(extremely low frequency electric fields : ELF-EFs) 영역에서 활발히 진행되고 있는데 그 주요 연구분야는 : ① 전자파와 백혈병을 비롯한 각종 암과의 관련성, ② 전자파가 태아에 미치는 영향 및 유산, 사산과의 관련성, ③ 전자파가 조혈기관에 미치는 영향, ④ 전자파가 면역시스템에 미치는

영향, ⑤ 전자파와 그의 각종 질환과의 관련성에 관한 것들이다.

이런 연구들이 역학적 연구, 동물실험 및 세포실험을 통하여 진행되고 있으나 연구자마다 다른 소견들을 보고하고 있어 뚜렷한 결론에는 도달하지 못한 실정이다. 이 중에서도 전자파 조사가 태아에 미치는 영향에 대한 보고는 일부 있으나, 상세한 연구는 볼 수 없다. 더욱이 전자파 환경에서 노화된 생체의 특징에 대한 보고는 전혀 없다.

2. 방 법

1) 전자파 조사

전자파에 성장, 임신 그리고 노화까지 조사된 생쥐에서 나타나는 특징과 그의 태아에서 나타나는 이상여부를 조사하기 위하여, 생물학적으로 사람과 근연관계에 있는 생쥐(마우스; BALB/c)를 대상으로 실험 하였다. 마우스를 전기장 2군, 자기장 2군 그리고 대조군 1군으로 모두 5군으로 나누고 암수를 따로 구분하여 실제 모두 10군으로 나누었으며, 각 군별로 12마리의 마우스를 2통에 나누어 넣고 실험에 사용하였다. 전자파 실험에 적합한 비금속성 특수 사육통을 제작한 후, 마우스를 넣고 키우면서 생후 6주부터 일정 수준의 전자파를 20-22주간 지속적으로 실험동물에 조사하고 동일조건의 암수 마

우스를 교미시켰으며, 임신후에도 동일한 조건으로 조사하였다. 출산후에도 부모와 그 새끼들에게 동일한 조건으로 조사하였으며, 노화된 부모는 생후 46주에 모두 부검하였다. 전력선 주파수(60Hz)에서 전기장은 IRPA/ ICNIRP 에서 일반인 종일 노출 안전한계치인 5kV/m와 직업인 단기간 노출 안전한계치인 30kV/m의 2군으로 나누었고, 자기장은 직업인 종일 노출시 IRPA의 한계치인 5G(=0.5mT)와 CENELEC의 한계치인 15G(=1.5mT)의 2군으로 나누어, 전자장 환경을 매일 24시간동안 계속 유지시켰다^{1,2,3,4}.

2) 몸무게, 먹이소모량 및 건강상태 조사

몸무게와 먹이소모량은 전자파 노출직전과 노출 후 1주일 간격으로 측정하였고 활동 및 건강상태는 1주일에 2회 관찰하였다.

3) 혈액학적 검사와 생화학적 검사

각종 혈구 및 생화학적 인자들을 조사하기 위해 전자파 노출직전과 노출 후 4주간격으로 12주까지 꼬리를 잘라 0.3ml를 채혈하였다. 채혈된 혈액을 5배 희석하여 혈액학적 검사는 자동혈액분석기를 이용하였고 생화학적 검사는 자동화학분석기를 이용하여 시행하였다. 혈액학적 검사로는 적혈구수(RBC), 헤모글로빈량(HGB), 적혈구량(HCT), 혈소판수(PLT), 백혈구수(WBC) 등을 측정하였다. 생화학적 검사로는 당뇨병과 관련되는 포도당(GLU), 콩팥기능과 관련 있는 우레아 나이트로젠(BUN), 혈관질환과 관련되는 콜레스테롤(CHO), 간기능과 관련되는 GOT 및 GPT를 측정하였다.

4) 마우스의 교배

암컷의 발정주기는 대략 4일이므로 각 주의 목요일 오후 7시경에 동일한 전자파조사 조건에 있는 수컷 1마리를 암컷의 사육통에 넣고, 그 다음 주 월요일 오전 8시경에 분리시켰다. 수컷을 바꿔가면서 같은 방법으로 4회 실시하였다.

5) 마우스의 제왕절개

임신후 17-19일째에 일부 어미 쥐는 제왕절개 되었다^{2,3}. 그대로 두면, 임신한 생쥐들은 19-20일째의 이른 새벽에 자연분만을 하므로, 이것들을 몰래 관측하는 것이 몹시 고된 작업이 된다. 자연분만을 하자마자, 어미들은 태반과 건강하지 않은 새끼들을 먹여치우고, 건강한 새끼들만 남기므로 전자장에 의한 비정상 태아 검사를 위한 바른 통계를 얻을 수 없다. 따라서 비정상 태아 통계를 얻기 위하여, 자연분만을 하기 전에 쥐의 자궁을 절개하여 태아의 상황을 관측하였다.

6) 기형의 검토

제왕절개를 한 후 기형등 이상이 발견된 태아는, 즉시 2.5% glutaraldehyde 또는 10% formalin용액으로 micro-needle을 사용하여 내부혈관을 wash-out 및 고정하고 그 태아를 10% formalin에 넣어 고정시켰다⁵. 조직학적면에서는 serial section을 하여 내부구조의 이상과 세포사 등을 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

1) 성장부터 전자파에 노출된 생쥐의 특징

본 실험에서 전자파는 몸무게 증가에 별 영향이 없는 것으로 판단되며 채혈 후 일시적으로 몸무게가 특히 숫놈에서 감소하는 경향이 있었다. 전자파에 노출되고 2-3번째주에는 먹이를 부수어 소모되는 먹이량이 상당히 증가되었고 5주 이후에는 대조군과 비슷한데, 특히 이런 경향은 숫놈과 자기장에서 뚜렷하였다. 이러한 행동의 변화는 전자파(특히 자기장)가 마우스 신경계에 영향을 미쳐 스트레스로 작용하다가 시간이 경과하면서 5주이후부터 차츰 적응해 가는 것 같다.

전자파는 적혈구를 감소시키는 경향이 있었다. 특히 숫놈에서 전자파 노출 4주에 뚜렷하였다. RBC, HGB와 HCT는 전자파 노출 4주된 모든 숫놈군에서 감소하였으며, 특히 5G 및 30kV/m에서 뚜렷하였다. 그러나 8주 및 12주에서 이들의 수치는 노출 전보다는 모두 낮았으나 4주보다는 모두 증가하여 점차 적응해 가는 것으로 보인다. 암놈군에

표 1. 성장부터 출산까지 60 Hz의 전자파가 조사된 생쥐의 임신율과 태아의 이상율

	태아의 이상유무 ^a					임신여부		
	어미	정상새끼	이상새끼	총새끼	이상율(%)	유	무	임신율(%)
5 kv/m	1 ^b	9 ^b	1 ^b	10 ^b	10.0	7 ^b	3 ^b	70
30 kv/m	3	28	5	33	15.2	8	0	100
5 G	5	43	11	54	20.3	11	1	91.7
15 G	5	48	8	56	14.3	11	0	100
control	2	18	1	19	5.3	6	2	75

a. 제왕절개는 자연분만이 이루어 지기 1-3일 전에 하였음.
 b. 어미 또는 새끼의 숫자.

표 2. 성장부터 출산까지 전자파가 조사된 생쥐의 태아에서 나타나는 육안적 이상조건

	조기사망	성장기사망	구개열	뇌노출	기 타
5kV/m		1			
30kV/m		1			4
5G	10			1	
15G	4	2	1		1
대조군	1				
합 계	15	4	1	1	5

도 5kV/m에서 노출후 적혈구가 감소하는 경향이 있었다.

백혈구의 숫자가 5kV/m의 암늬군에서 증가 되었다. 노출전에는 WBC가 10×10^3 개/ μ l 이상이 1마리밖에 없었으나 노출후에는 2-6마리로 증가되었다. 그러나 다른 군에서는 이런 경향이 나타나지 않았다.

2) 성장부터 임신까지 조사된 생쥐에서 태어난 태아의 조기사망과 선천이상

전자파가 조사된 어미의 임신율은 70%에서 100%를 나타냈고 대조군은 75%로, 유의한 차이가 없었다(표 1). 태아에 나타난 이상율은 5kV/m에서 10.0%, 30kV/m에서 15.2%, 5G에서 20.3% 그리고 15G에서

14.3%로 대조군 5.3%에 비해 1.9 - 3.8배 높았다(표 1). 전자파는 태아의 조기사망(외관상으로 눈이 발견되기 전인 임신 11일까지의 사망), 성장기사망, 그리고 구개열(cleft palate), 뇌노출(exencephaly) 등의 기형을 유도하였다(표 3). 특히 5G는 조기사망을 유도하는데 비해 15G와 30kV/m는 성장기사망과 기형을 유도하였다(P<0.05)(표 2).

일부 조기사망한 태아의 심장에서 단심실(single ventricle)이 발견되었고, 작은심실과 심근육의 비대, 변성 및 불규칙배열이 발견되었다. 대동맥판(aortic valve)과 폐동맥판(pulmonary valve) 부위에서 endocardial cushion의 소결절형성(nodular formation)이 발견되었다. 심실과 심방에 울혈(diffuse congestion)이 있었다. 폐에서는 울혈(cong-

표 3. 40주동안 전자파에 노출된 마우스의 해부학적 소견

	5kV/m		30kV/m		5G		15G		대조군	
	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F
Liver										
petechiae or hemorrhage	3						1	2		
fatty liver			2							
discoloration			1		2		1		1	
tumor	1						1			
Kidney										
petechiae	2						2		1	
intra-capsular hemorrhage							1			
Lung										
tumor			2		1		2	1		
pneumonia			1							
Heart										
discoloration	2						1			
Testis										
tumor			1							
Ovary										
hemorrhage			1							
H-mole					1					
Development arrest of sternum									1	

표 4. 40일 동안 전자파에 노출된 마우스에서 발견된 종양

	5kV/m	30kV/m	5G	15G	대조군
Liver	1			1	
Lung		2	1	3	
Testis		1			
Ovary(H-mole)			1		
Lip		1			
Leg			2		
Soft tissue				1	

estion)과 출혈이 나타났다.

자기장을 조사하고 형태형성기 후기에 기형을 분석한 연구에서 주로 척추피열(spina bifida), 복부노출(abdominal hernia), 수두증(hydrocephaly), 뇌노출(exencephaly), 구개열(cleft palate) 등의 기형이 관찰된다는 보고가 있다⁶⁾. 본 실험에서도 자기장의 조건인 5G와 15G에서 각각 뇌노출과 구개열을 보이는 태아가 관찰되었다(표 2).

3) 전자파 환경에서 노화된 생쥐의 해부학적 특징

생후 6주부터 평균40주까지 조사된 전자파 환경에서 노화된 부모 생쥐들과, 그동안 자라서 17주까지 조사된 일부 새끼 생쥐들을 부검하여 형태적인 변화를 살펴 보았다. 전자파 환경에서 노화된 생쥐에서는 간, 폐, 신장, 심장, 고환, 난소에서 점상출혈(petechial hemorrhage), 변색, 종양 등이 발견되었고, 특히 종양이 폐, 간, 난소, 다리 등에서 발견

되었다(표 3, 표 4). 난소와 고환이 대조군에 비해 크기가 유의하게 적었다. 임신부터 조사된 새끼 생쥐에서는 뒤 오른쪽 발가락이 모두 없는 기형(5G)과 비대된 간의 다분엽화(lobulation; 15G)가 발견되었으며, 여러장기의 크기가 대조군에 비해 비특이적으로 적었다. 전자파를 노화때 까지 조사하면 종양이 유발되었고 여러장기에 이상이 야기되었으며, 특히 난소와 고환이 축소되었다.

4. 결 론

본 실험은 마우스에 성장, 임신 그리고 노화까지 60 Hz의 전자파를 조사시켰을 때 나타나는 마우스와 그의 2세대에서 보여진 특징을 알아보기 위하여 실시되어졌다.

전자파조사는 몸무게의 변화와 관련성은 없어 보이며, 스트레스로 작용할 가능성이 높다. 또한 전자파는 숫놈군에서 적혈구를 감소시키는 경향이 있었다. 그러나 이러한 변화는 노출 5-8주 후에는 점차 적응해 가는 것으로 보였다.

전자파가 조사된 어미의 임신율과 임신중 태아에 미치는 영향을 조사한 결과, 전자파는 임신율에는 유의한 영향을 미치지 않았으나 태아의 이상을 1.9 - 3.8배 증가시켰다. 특히, 5G는 태아의 조기사망을 유도하는데 비해 15G와 30kV/m는 성장기(기관형성기) 사망과 기형을 유도하였다.

노화까지 전자파가 조사된 생쥐에서는 간, 폐, 신장, 고환, 난소 등의 기관에 병리적 변화를 야기하였으며, 특히 폐, 간, 난소, 다리 등에서 다수의 종양이 발견되었다. 또한 난소와 고환의 크기가 대조군에 비해 유의하게 적었다.

이러한 결과는 여러 국제기관에서 제시한 전자파의 최대허용한계치가 너무 높게 설정되어 있으며, 허용한계치의 전자파는 환경요인중의 하나로 태아의 사망 및 선천이상을 유도하고 여러 기관에 영향을 미쳐 이상을 초래할 뿐 만 아니라 종양을 유도한다고 볼 수 있다.

5. 참고 문헌

1. 한국전자과학회內 전자장과 생체관계연구회. 전자파로 인한 장해 실태 조사와 인체 보호기준 설정에 관한 연구: 제6장 전자파 안전 대책, pp. 151-167, 통신개발연구원 정보통신학술연구과제 최종보고서. 96-02, 1997.
2. Kim YM, Kwon YI, Kim JH, Kim BS, and Kim YW. ELF electric and magnetic field effects to mice embryos and fetuses. Annual Review of Bioeffects Research. pp. 34-35. Nov. 1997.
3. 김윤명, 권용일, 이승배, 김진희, 김병섭, 김윤원. 생쥐의 배아 및 태아에 대한 극저주파 전자장의 영향. Telecommunication Review, 7:814-828, 1997.
4. Kim YW, Lee JS, Kim YM, Cho MK and Cho JY. Gross and histological study of abnormal fetus in mice continuously exposed to 60Hz electromagnetic fields for 6 month. 1st International Symposium of Congenital Anomalies in Korea, Institute of Medical Science, Hallym Univ. pp.67-70, 1998.
5. Ishikawa S(Cho JY), Iwasaki J, Soga K, Tsunemi T, Nozaki Y, Chikaoka H and Nakai Y. Cardiovascular malformation and functional changes induced by trichloroethylene in developing chick embryos. Developmental Mechanisms of Heart Disease. 43:361-364. 1995.
6. Huuskonen H, Juutilainen J and Komulainen H. Effects of low-frequency magnetic fields on fetal development in rats. Bioelectromagnetics. 14:205-213.1993