

20 kHz 전자파의 생체 영향 평가

이 해 준 · 이 윤 실

한국원자력의학원
방사선영향연구부

I. 개 요

전자파가 인체에 미치는 영향을 과학적으로 규명하기 위해서는 동물/세포 실험 및 역학/자원자 연구가 필요하다. 세포 실험은 주로 기전 연구를 위해 수행되며, 세포 실험에서 나타난 결과가 실제적으로 동물 또는 인체에 어떤 영향을 미치는지를 밝힐 수 없기 때문에 상당히 제한적이다. 한편, 동물 실험 연구도 중간 외삽(extrapolation)으로 인한 불확실성이 있기 때문에 동물 실험에서 나타난 결과를 인체에 그대로 적용시킬 수는 없다. 이에 비해 역학 연구는 인간을 대상으로 하기 때문에 전자파의 인체 영향에 대한 궁극적인 결론 도출을 위해 필요하나, 노출량 평가가 정확해야 하고, 대상 표본 수가 충분히 커야 한다는 제약점이 있다.

이러한 전자파의 위험성 평가 연구는 그 대상 노출원이 매우 다양하기 때문에 제한된 예산으로 효과적인 연구를 수행하기 위해서는 연구의 우선 순위를 결정하는 것이 매우 중요하다. 현재 국제적으로 RF 대역 전자파 인체 영향 연구는 휴대폰 노출에 대한 연구에 치중되어 있고, 국내에서도 다른 연구팀에 의해 휴대폰 전자파의 인체 영향에 대한 연구가 수행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국내외에서 현재 수행되고 있지 않으면서 국민들의 생활과 밀접한 관계가 있고, 또한 국민들이 불안하게 생각하고 있는 노출원을 대상으로 연구를 수행하였다.

중간 주파수(MF) 대역 전자파에 대한 연구는 국제적으로 연구가 많이 되고 있지 않고 있고, 특히 본 연구에서 수행한 20 kHz 톱니파 자기장 노출은 모니

터, 가정용 유도 가열 장치(induction heater)와 관련되므로, 장기간에 걸친 연구를 수행하였다.

본 연구는 국외 전자장 노출에 대한 다양한 자료^{[1]~[6]}를 분석하여 중간 주파수(MF, middle frequency) 대역인 20 kHz 미약 자기장 노출에 대한 영향을 평가하는 실험으로 90일간 노출하였을 때에 미치는 영향을 쥐(rat)에서 관찰하였고^[7], 임신 시 태아 발육에 미치는 영향 관찰을 위해 임신한 마우스를 대상으로 실험하였다^[8]. 암 발생에 미치는 영향을 관찰하기 위해 유방암, 폐암 및 피부암 발생에 미치는 영향을 관찰하였으며, 90일간 전자파 노출이 혈액학적, 혈액생화학적 및 병리학적으로 전혀 영향을 미치지 않았기 때문에 1년 이상의 장기간 노출에 대한 영향을 관찰함으로써 20 kHz 6.25 μ T 강도에 대한 생체 영향에 대한 결론을 내리고 향후 연구 방향을 설정하였다.

II. 연구 내용

2-1 미약 MF 전자파의 12개월 및 18개월 노출 시 독성 평가

- 전자파 조사 및 실험 동물: 6주령 Sprague-Dawley(SD) 쥐(rat) 암수 각각 10마리씩을 한 그룹으로 하여 전자파 조사군과 대조군으로 분리하였고 한국전자통신연구원(ETRI)에서 제작한 노출 장치에 노출군을 20 kHz 6.25 μ T에 하루 6시간씩 주 5일, 1년 및 1년 6개월간 노출하였다. 실험 동물의 환경은 온도 22±1 °C, 상대 습도 50±20 %, 명암 주기 각 12시간, 조도 200 Lux이었고, 케이지 당 2마리의 쥐를 넣어 사육하였다^[9].

- 시험군의 설정: 대조군 및 전자파 노출군으로 암수 각각 10마리씩 분류한 뒤 노출군은 6.25 μ T의 자기장을 노출하였다.
- 일반 증상 관찰: 일반 증상은 매일 관찰하였고, 체중은 2주에 1회 측정하였다.
- 뇨 검사: 부검 당일 뇨를 대사 케이지(metabolic cage)를 이용하여 채취, 자동 뇨 분석 장치에 의해 수소 이온 농도 지수(pH), 비중, 단백질, 케톤체, 적혈구, 백혈구, 당, 빌리루빈, 우로빌리노젠 등을 측정하였다.
- 혈액학적 검사: 대조군과 노출군을 에테르 마취 하에 개복하여 대동맥으로 채혈한 혈액을 응고를 방지하기 위해 EDTA가 함유된 시험관에 보관하였고, 자동혈구 계수기를 이용하여 백혈구수(WBC), 적혈구수(RBC), 혈색소 농도(HGB), 적혈구 용적(HCT), 평균 적혈구량(MCV), 평균 적혈구량(MCH), 평균 혈색소 농도(MCHC), 혈소판수(PLT)를 측정하였다.
- 혈액 생화학적 검사: 혈액학적 검사를 실시한 동물에서 채취한 혈액을 3,000 rpm에서 10분간 원심 분리하여 얻은 혈청을 혈액 생화학 분석기를 이용하여 검사하였다.
- 장기중량 측정: 대조군과 노출군을 부검하여 폐, 간장, 신장, 정소, 난소, 비장, 뇌, 뇌하수체,

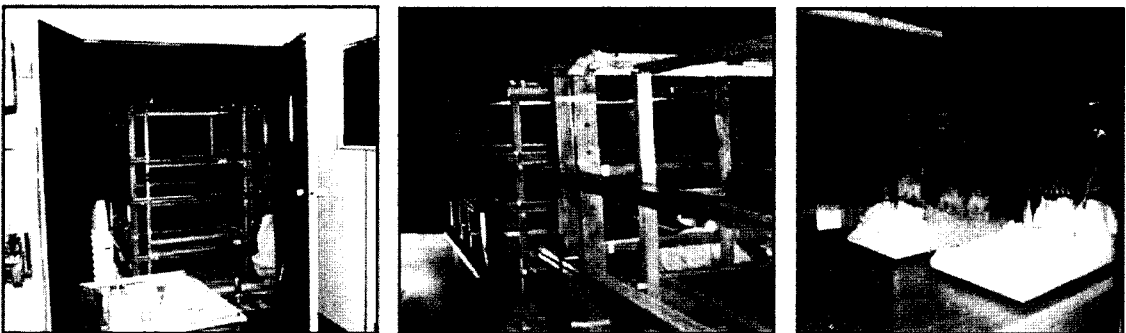
부신, 심장의 장기 중량을 측정하고, 육안적 이상 여부를 관찰한 후 10 % 중성 포르말린으로 고정하였다.

- 병리조직학적 검사: 고정된 장기는 파라핀 블록을 만들어 보관하였고 3 μ m로 절단하여 슬라이드에 고정하여 hematoxylin-eosin 염색 실시하였다. 염색한 슬라이드는 광학현미경 하에서 이상 여부를 확인하였다.

2.2 MF 전자파가 임신 마우스의 태아 발육에 미치는 영향

임신 중 스트레스는 태아에 중대한 영향을 미칠 수 있으며, 주요 요인으로는 전자파 노출 및 임신 시기 등이 있을 것으로 사료되어, 본 연구는 총 임신 시기 중 기관 형성 기간에 전자파에 노출된 경우 태아 형성에 미치는 영향을 규명하였다.

- 실험 동물 및 전자파 노출: 10~12주령의 출산 경험이 없는 ICR 비근교계 마우스를 사용하였다. 교배 다음날 아침 수컷을 분리하고 질전(vaginal plug)이 확인된 경우 임신 0일로 하며, 임신 6일부터 16일까지 전자파에 노출시킨 후 대조군과 노출군, 각 실험군 당 20마리의 임신 어미를 공시하며 임신 18일째 공히 부검 실시하였다.



[그림 1] 중간 주파수 자기장 노출 장치

- 태자의 관찰: 각 실험군 마우스를 임신 18일째에 제왕절개하여 착상수, 생존 및 사망 태자수, 태자의 성별, 체중, 체장, 두부의 길이, 너비 및 태반의 무게 등 측정하였다. Uma Devi의 방법에 따라 흡수(resorption), 배자 사망(embryonic death) 및 태자 사망(fetal death) 분류 조사하였고, 총 사망률은 착상 총수로서 사망 태자를 나눈 백분율로 하며, 성장 지연(growth retardation)의 기준은 정상 대조군 체중 편차의 2배 이상의 차이를 보이는 체중 미달의 경우로 하였다.
- 외부 기형의 관찰: 실험군의 전체 생존태자의 외부 장에 유형을 실체 현미경으로 관찰하며, 관찰의 지표는 두부(두개열 외 32지표), 흉부(심장 일소 외 3지표), 미부(무미 외 3지표), 사지(무지 외 12지표) 및 기타(척수열 외 8지표) 등으로 구분하였다.
- 내부 기형 및 골격 기형의 관찰: 외부 기형 검사 후 좌측 자궁뿔 상부에서 홀수번째의 태자는 내부 장기 기형 관찰을 위해 Bouin 용액에 고정하였고, 나머지 1/2의 태자는 골격 기형 관찰을 위해 Inouye의 방법과 kimmel 및 Trammell의 방법의 변형한 방법을 적용하여 alcian blue 및 alizaline red S 이중 염색을 실시한 후 관찰하였다. 내부 기형 지표는 두부(뇌실 확장 외 4지표), 흉부(횡격막 탈장 외 11지표), 복부(신우 확장 외 11지표) 및 기타로 하며, 골격 기형 지표는 두개골(두개골 결손 외 2지표), 척추(추체 결여 외 5지표), 늑골(결여 외 5지표), 흉골(결여 외 3지표), 사지골격(결여 외 2지표) 및 기타로 분류 관찰하였다. 골격의 기형과 함께 골격의 변형(척추골 골화 중심 분리 외) 빈도도 관찰 조사하였다.

2-3 MF 전자파의 유방암 발생에 미치는 영향

- 실험 동물 및 전자파 노출: 총 80마리의 암컷 6주령의 출산 경험이 없는 Sprague-Dawley 쥐를

사용하였다. DMBA 투여군과 비투여군을 설정하였으며, 정상 대조군, DMBA 단독 투여군, 전자파 단독 노출군, DMBA와 전자파 병용 투여군으로 구분하였다. 각 군은 20마리의 쥐를 분배하였고 DMBA량은 마리 당 15 mg을 1회 경구 투여하였고, 14주에 부검하여 유방암 발생 여부 확인하였다. 전자파 노출군의 경우, DMBA 투여 다음날부터 부검일까지 20 kHz, 6.25 μ T를 하루 8시간씩 노출하였다.

- 병리 조직학적 검사: 생성된 유방암은 4% 포르말린에 고정, 파라핀 블록을 만들어 보관하였고 3 μ m로 절단하여 슬라이드에 고정하고 hematoxylin-eosin 염색을 실시하였다. 염색한 슬라이드는 광학 현미경 하에서 발암 정도를 확인하였다.

2-4 MF 전자파의 폐암 발생에 미치는 영향

- 실험 동물 및 전자파 노출: 생후 24시간 이내의 ICR 신생 마우스에 폐암이 유발된다고 알려진 BP(benzo(a)pyrene) 0.3 mg을 피하주사하였다. BP는 소량의 아세톤(acetone)에 녹이고 수욕통에 보관중인 40 $^{\circ}$ C 정도의 1% gelatin 수용액에 현탁시킨 뒤 아세톤은 질소가스(nitrogen gas)를 이용하여 제거한 후 마우스 견갑골 부위에 0.02 mL씩 피하주사하였다. 정상 대조군, BP 단독 투여군, 전자파 단독 조사군, BP와 전자파 병용 투여군으로 구분하였고, 각 군에는 암수 각각 20마리 마우스를 분배하였다. 생후 3주부터 전자파에 노출시키고 생후 9주에 부검, 폐를 적출하여 선종(adenoma) 발생을 확인하였다.
- 병리조직학적 검사: 적출된 폐는 Tellyesniczky's solution(70% ethanol 100 mL + formalin 3 mL + gacial acetic acid 5 mL)에 고정시킨 뒤, 파라핀 블록을 만들어 보관하고 3 μ m로 절단하여 슬라이드에 고정하고, hematoxylin-cosin 염색을 실시

하였다. 생성된 폐선종을 육안으로 측정하였다.

2-5 MF 전자파가 피부암 발생에 미치는 영향

- 암컷 7주령의 출산 경험이 없는 ICR 마우스를 사용하였으며, 전 실험 기간 중 자유롭게 급수 급식하였다. 정상 대조군, DMBA 단독 투여군, DMBA 및 발암 촉진 인자인 tetradecanoylphorbol ester(TPA)과 비투여군을 설정하였으며, 정상 대조군, DMBA 단독 투여군, DMAB + TPA 투여군, 전자파 단독 조사군, DMBA와 전자파 병용 투여군, DMBA+TPA와 전자파 병용 투여군으로 구분하였다. 각 군에 20마리의 마우스를 분배하였고, DMBA량은 마리 당 100 μg 을 100 μL 의 아세톤에 녹여 피부에 1회 도포하였으며, 발암 촉진인자인 TPA 4 μg 을 100 μL 아세톤에 녹여 DMBA 도포 1주 후부터 매주 1회 19주간 계속하였다. 실험 시작 20주에 각 군을 부검하여 유방암 발생을 확인하였다. 전자파 노출군의 경우, DMBA 투여 다음날부터 20 kHz, 6.25 μT 를 하루 8시간씩 부검일까지 노출시켰다.
- 생성된 피부암은 4% 포르말린에 고정, 파라핀 블록을 만들어 보관하고 3 μm 로 절단하여 슬라이드에 고정하고 hematoxylin-eosin 염색을 실시하였다. 염색한 슬라이드는 광학현미경 하에서 발암 정도를 확인하였다.

III. 연구 결과

3-1 MF 전자파의 12개월 및 18개월 노출시 독성 평가¹⁰⁾

- 체중 및 장기의 무게: 부검 시 쥐의 체중 및 적출한 장기의 무게를 측정된 결과, 노출군과 대조군의 차이는 없었다(<표 1>).
- 혈액학적 특성 변화: 전자파에 노출된 쥐에서 채혈한 혈액을 회석하여 혈액학적 검사를 실시

- 한 결과, 적혈구에 관련된 수치, 백혈구 및 혈소판에 관련된 수치 모두에서 전자파 노출군과 대조군과의 차이를 발견할 수 없었으나, 1년 노출한 군에서는 중성구수가 암컷에서 증가하였고, 1년 6개월 노출의 경우 림프구수가 수컷에서 감소(<표 2>)하여 이에 대한 정확한 결과는 강도를 높인 후의 재실험이 필요할 것으로 사료된다.
- 혈액생화학적 특성 변화: 채혈한 혈액으로부터 분리된 혈청을 대상으로 생화학적 특성을 검사하였다. 간기능과 관련된 수치인 총 빌리루빈(TBIL: total bilirubin), 총 콜레스테롤(TCHO: total cholesterol), 아스파라진산 아미노전이효소(AST: aspartate aminotransferase), 알라닌 아미노전이효소(ALT: alanine aminotransferase), 알칼리성 인산분해효소(ALP: alkaline phosphatase) 및 당 수치와 관련된 글루코스(GLU: glucose), 신장 기능과 관련된 총 단백질(TP: total protein), 혈액 요소 질소(BUN: blood urea nitrogen), 크레아티닌(CRTN: creatinine) 모두에서 두 군의 차이가 없었다(<표 3>).
- 뇨의 생화학적 특성 검사: 부검 전날 대사 케이지를 이용하여 뇨를 모은 후 뇨분석기를 이용하여, 생화학적 분석을 실시하였으나 신장의 기능과 관련된 수치인 수소이온농도지수, 비중, 단백질, 케톤체, 적혈구, 백혈구, 당, 빌리루빈, 우로 빌리노겐치에서 차이가 없었다(<표 4>).
- 장기의 조직병리학적 소견: 부검한 장기를 중성 포르말린에 고정한 후 hematoxylin-eosin 염색 실시, 현미경 하에 조직학적 이상 관찰, 간장, 신장, 정소, 난소, 비장, 뇌, 뇌하수체, 부신, 심장을 대상으로 관찰, 노출군에서 병리학적 이상 현상을 관찰할 수 없었다.

3-2 MF 전자파가 임신 마우스의 태아 발육에 미치는 영향¹¹⁾

- 장기 형성: <표 5>에서 보는 바와 같이 착상수,

<표 1> 20 kHz MF 전자파에 장기간 노출된 쥐의 체중과 장기 무게

	12개월 노출군						18개월 노출군					
	수컷			암컷			수컷			암컷		
	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value
체중	689±50	643±49	0.08	368±44	358±53	0.09	851±89	761±74*	0.03	458±88	422±72*	0.05
비장	0.82±0.12	0.73±0.10	0.55	0.60±0.13	0.53±0.12	0.66	0.89±0.13	0.73±0.25	0.42	0.62±0.21	0.53±0.12	0.63
폐	2.83±0.30	2.53±0.34	0.25	1.99±0.31	1.82±0.38	0.52	2.65±0.24	2.41±0.43	0.36	1.98±0.23	2.00±0.34	0.93
간	17.8±2.7	16.8±1.3	0.13	9.43±2.6	8.91±1.1	0.43	16.4±1.2	17.2±1.5	0.14	12.9±3.1	11.3±3.3	0.06
신	2.1±0.2	1.9±0.2	0.33	1.3±0.2	1.3±0.2	1.00	2.2±0.1	2.1±0.2	0.62	1.3±0.2	1.3±0.1	1.00
장	2.2±0.2	1.9±0.3	0.19	1.2±0.2	1.3±0.1	0.60	2.1±0.2	2.2±0.1	0.57	1.3±0.1	1.3±0.2	1.00
정	1.8±0.2	1.9±0.2	0.62				1.9±0.2	1.8±0.1	0.62			
소	1.8±0.2	1.9±0.2	0.62				1.8±0.1	1.9±0.3	0.71			
난				0.1±0.2	0.1±0.2	1.00				0.1±0.1	0.1±0.2	1.00
소				0.1±0.1	0.1±0.2	1.00				0.1±0.2	0.1±0.2	1.00
여	1.9±0.3	2.0±0.2	0.66	1.8±0.2	1.9±0.3	0.66	1.9±0.3	1.9±0.2	1.0	1.8±0.1	1.8±0.1	0.10
심장	1.8±0.3	1.7±0.1	0.62	1.0±0.3	1.0±0.1	1.00	2.1±0.3	2.3±0.2	0.38	1.7±0.3	1.7±0.2	1.00
가슴샘	0.4±0.06	0.3±0.04	0.33	0.1±0.04	0.2±0.05	0.30	0.3±0.2	0.3±0.1	1.0	0.2±0.1	0.2±0.1	1.00

체중 단위(그램)

<표 2> 20 kHz MF 전자파의 장기간 노출된 쥐의 혈액학적 검수

	12개월 노출군						18개월 노출군					
	수컷			암컷			수컷			암컷		
	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value
적혈구(10^6 / μ L)	689±50	643±49	0.08	368±44	358±53	0.09	851±89	761±74*	0.03	458±88	422±72*	0.05
혈색소(g/dL)	0.82±0.12	0.73±0.10	0.55	0.60±0.13	0.53±0.12	0.66	0.89±0.13	0.73±0.25	0.42	0.62±0.21	0.53±0.12	0.63
적혈구용적(%)	2.83±0.30	2.53±0.34	0.25	1.99±0.31	1.82±0.38	0.52	2.65±0.24	2.41±0.43	0.36	1.98±0.23	2.00±0.34	0.93
혈소판(10^3 / μ L)	17.8±2.7	16.8±1.3	0.13	9.43±2.6	8.91±1.1	0.43	16.4±1.2	17.2±1.5	0.14	12.9±3.1	11.3±3.3	0.06
백혈구(10^3 / μ L)												
중성구(10^3 / μ L)	2.1±0.2	1.9±0.2	0.33	1.3±0.2	1.3±0.2	1.00	2.2±0.1	2.1±0.2	0.62	1.3±0.2	1.3±0.1	1.00
림프구(10^3 / μ L)	2.2±0.2	1.9±0.3	0.19	1.2±0.2	1.3±0.1	0.60	2.1±0.2	2.2±0.1	0.57	1.3±0.1	1.3±0.2	1.00
단핵구(10^3 / μ L)												
호염기구(10^3 / μ L)	0.4±0.06	0.3±0.04	0.33	0.1±0.04	0.2±0.05	0.30	0.3±0.2	0.3±0.1	1.0	0.2±0.1	0.2±0.1	1.00

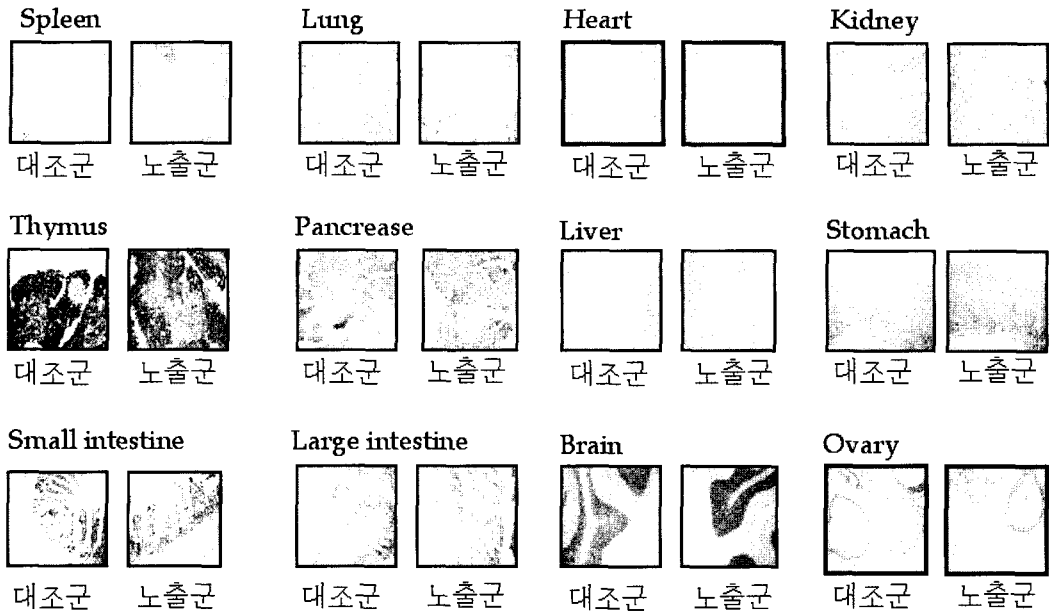
* 대조군과 비교하여 통계적 유의성 ($p < 0.05$)을 가짐.

<표 3> 20 kHz MF 전자파의 장기간 노출된 쥐의 혈액생화학적 검사

	12개월 노출군						18개월 노출군					
	수컷			암컷			수컷			암컷		
	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value
총 단백질(g/dL)	5.75±0.41	643±49	0.08	368±44	358±53	0.09	851±89	761±74*	0.03	458±88	422±72*	0.05
당(g/dL)	126±71	0.73±0.10	0.55	0.60±0.13	0.53±0.12	0.66	0.89±0.13	0.73±0.25	0.42	0.62±0.21	0.53±0.12	0.63
아스파라진산 아미노 전이 효소(IL/U)	2.83±0.30	2.53±0.34	0.25	1.99±0.31	1.82±0.38	0.52	2.65±0.24	2.41±0.43	0.36	1.98±0.23	2.00±0.34	0.93
알라닌 아미노 전이 효소(IL/U)	17.8±2.7	16.8±1.3	0.13	9.43±2.6	8.91±1.1	0.43	16.4±1.2	17.2±1.5	0.14	12.9±3.1	11.3±3.3	0.06
크레아티닌(mg/dL)												
혈액 요소 질소(mg/dL)	2.1±0.2	1.9±0.2	0.33	1.3±0.2	1.3±0.2	1.00	2.2±0.1	2.1±0.2	0.62	1.3±0.2	1.3±0.1	1.00
총 빌리루빈(mg/dL)	2.2±0.2	1.9±0.3	0.19	1.2±0.2	1.3±0.1	0.60	2.1±0.2	2.2±0.1	0.57	1.3±0.1	1.3±0.2	1.00
총 콜레스테롤(mg/dL)												
알칼리성 인산 분해 효소(IL/U)	0.4±0.06	0.3±0.04	0.33	0.1±0.04	0.2±0.05	0.30	0.3±0.2	0.3±0.1	1.0	0.2±0.1	0.2±0.1	1.00

<표 4> 20 kHz MF 전자파의 장기간 노출된 쥐의 노생화학적 검사

	12개월 노출군						18개월 노출군					
	수컷			암컷			수컷			암컷		
	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value	대조군	노출군	p-value
혈구 성분(RBC/U)	5±15.8	6.5±15.9	0.41	11.1±22.0	10.1±19.1	0.62	11.1±12.0	11.1±17.1	0.55	12.1±12.0	11.6±19.1	0.55
빌리루빈(mg/100mL)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
우로빌리노겐(mg/100mL)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
케톤체(mg/100mL)	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
단백질(mg/100mL)	97±50	100±39	0.32	101±25	111±43	0.11	101±43	103±53	0.34	112±47	110±34	0.55
질소(mg/100mL)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
당(mg/100mL)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
수소 이온 농도 지수	7.2±0.7	7.0±0.5	0.57	7.2±0.7	7.0±0.4	0.55	7.2±0.7	7.0±0.5	0.57	7.2±0.7	7.0±0.5	0.57
비중	1.0±0.003	1.0±0.005	1.0±0.003	1.0±0.003	1.0±0.005	1.0±0.005	1.0±0.005	1.0±0.005	1.0±0.005	1.0±0.003	1.0±0.005	1.0±0.005



[그림 2] 18개월 노출 시 병리학적 소견

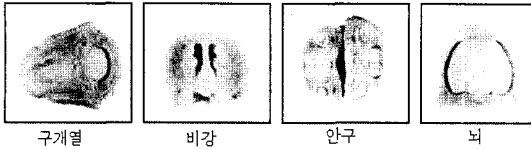
<표 5> 임신 모체의 기관 형성 기간 중 20 kHz MF 전자파 노출 시 태자에 미치는 영향

검사 항목	대조군	노출군
임신 모체수	18	16
태반수	240	219
사망 배자수	2	0
사망 태자수	0	3
흡수수	0	0
출생전 사망율	2(0.83)	3(1.37)
생존 태자수	238	216
성장 지연 태자수(%)	15(6.30)	23(10.65)
체중(g)	1.45±0.12	1.34±0.08
몸길이(cm)	2.94±0.10	2.85±0.08
머리길이(cm)	1.03±0.03	0.99±0.02
머리너비(cm)	0.65±0.02	0.67±0.02

성장 지연 태자(GRF): 정상 대조군의 평균 체중과 체중 편차의 2배 이상의 차이를 보이는 체중 미달의 경우

생존 및 사망 태자수, 태자의 성별, 및 태반의 무게 등에서 전자파 노출에 의해 통계학적으로 유의 있는 차이는 나타나지 않았다. 성장 지연 태자(growth retarded fetuses: GRF)는 전자파 노출군에서 미약한 증가를 보였지만 통계학적 유의성 없었다. 체중, 머리길이, 머리 너비 또한 전자파 노출에 의해 영향을 미치지 않았다.

· 외부 및 내부 기형: <표 6> 및 <표 7>에서 보는 바와 같이 전자파 노출에 의한 외부 기형 형성의 차이점은 나타나지 않았다. 전자파 노출, 한 예에서 혈종(hematoma)이 관찰되었고 대조군에서 한 예의 발가락 기형이 관찰되었으나, 총 외부 기형 형성에 대한 분석에서 통계학적 차이점은 없었다. 내부 기형의 경우, 전자파가 노출된 한 예에서 구개열(cleft palate)이 관찰되었고, 또 한 예에서 신우 확장(dilatation of renal pelvis)이 관찰되었으나 통계학적인 유의성은 관찰되지 않았다.



[그림 3] 외부 및 내부 기형 관찰

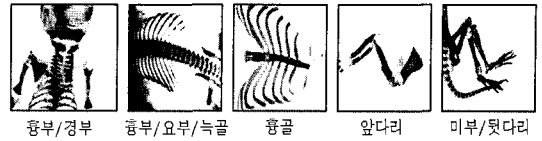
<표 6> 임신 모체의 기관 형성 기간 중 20 kHz MF 전자파 노출 시 태자 외부 기형 빈도

	대조군	노출군
검사 태자수	238	216
배꼽 탈장	0	0
굴곡미	0	0
단미	0	0
만곡족	0	0
발가락 기형	1(0.42)	0
왜소	0	0
항문 폐쇄	0	0
혈종	0	1(0.46)

<표 7> 임신 모체의 기관 형성 기간 중 20 kHz MF 전자파 노출 시 태자 내부 기형 빈도

	대조군	노출군
검사 태자수	119	108
뇌실확장	0	0
비강협착	0	0
구개열	0	1(0.93)
심장좌선	0	0
비정상폐엽	0	0
신우 확장	0	1(0.93)

- 골격 기형: 전자파 노출에 의한 골격 기형 형성의 이상은 관찰되지 않았다(<표 8>). 다만 전자파 노출 한 예에서 흉골형성부전(hypoplasia of sternbrae)이 관찰되었으나 통계학적으로 유의하지 않았다.



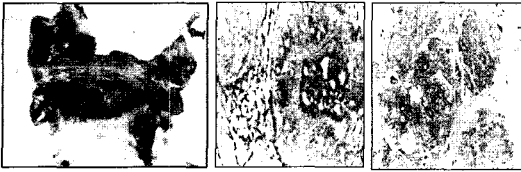
[그림 4] 골격 기형 관찰

<표 8> 임신 모체의 기관 형성 기간 중 20 kHz MF 전자파 노출 시 태자 골격 기형 빈도

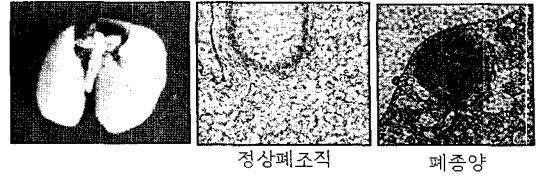
	대조군	노출군
검사 태자수	119	108
경추골 융합	0	0
후두골 기형	0	0
경추골 분리	0	0
흉추골 융합	0	0
요추골융합	0	0
늑골 결여	0	0
늑골 융합	0	0
늑골 파상	0	0
늑골 형성부전	0	0
흉골 이형성	0	1(0.93)
흉골 결여	0	0
경골 만곡	0	0
앞발목골 결여	0	0
뒷발목골 결여	0	0

3-3 MF 전자파의 유방암 발생에 미치는 영향¹¹⁾

- 체중 변화: 정상 대조군, DMBA 단독 투여군, 전자파 단독 노출군, 전자파 및 DMBA 병용 처리군을 14주 동안 관찰한 체중의 변화는 통계학적으로 유의한 차이가 없었다(<표 9>).
- 유방암의 조직병리학적 관찰: DMBA(15 mg/rat) 처리 후 14주에 생성된 유방암을 조직 병리학적으로 관찰하였을 때 악성화된 유방암임을 확인할 수 있었으나 전자파 노출에 의한 악성화 정도의 영향은 관찰되지 않았다. 전자파 단독 노출군의 경우 유방암이 발생되지 않았다.



[그림 5] 유방암 관찰 및 병리적 소견



[그림 6] 폐암 관찰 및 병리적 소견

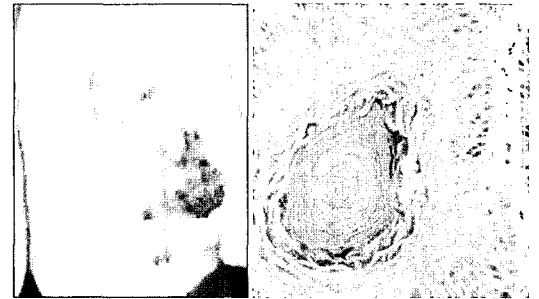
- 유방암 발생 쥐(rat)수 및 유방암 크기(부피): 각 군에서 발생한 유방암 발생 빈도 및 크기는 <표 9>와 같다. 전자파와 DMBA 병용 투여가 유방암 발생 빈도 및 크기에 영향을 주지 않았으며, 병리학적 검사에 의해 암화 정도를 관찰하였는데 이에 대한 결과도 DMBA 단독 및 전자파 병용 투여가 차이가 없었다(<표 10>).

3.4 MF 전자파의 폐암 발생에 미치는 영향¹¹⁾

- 체중 변화: 정상 대조군, BP 단독 투여군, 전자파 단독 노출군, 전자파 및 BP 병용 처리군을 6주 동안 관찰한 결과 통계학적으로 유의한 차이 보이지 않았다(<표 11>).
- 폐암의 조직 병리학적 관찰: 신생 마우스에 BP (0.3 mg/mouse) 처리 후 3주 후 이유부터 전자파에 노출하여 6주간 노출시킨 후 부검하여 폐를 적출하여 병리학적으로 관찰한 결과 전자파를 병용 노출 유무에 상관없이 차이가 없었으며, 전자파 단독 조사한 경우에는 암 발생에 영향을 미치지 않았다.
- 폐암 발생 수 및 빈도: 각 군에서 발생한 폐암 발생 빈도 및 수는 <표 11>과 같으며, 전자파와 BP 병용 투여가 유방암 발생 빈도 및 수에 영향을 주지 않았다.

3.5 MF 전자파의 피부암 발생에 미치는 영향¹¹⁾

- 정상 대조군, DMBA 단독 투여군, DMBA+TPA 투여군, DMBA 및 전자파 병용 투여군, DMBA+



[그림 7] 피부암의 병리학적 소견(유두종)

TPA 및 전자파 병용 투여군, 전자파 단독 노출군을 20주 동안 관찰한 체중의 변화는 각 군간의 통계학적으로 유의한 차이는 보이지 않았다(<표 12>).

- 피부암을 조직 병리학적으로 관찰하였을 때 관찰된 암은 모두 유두종(papilloma)으로 양성 종양이었고 전자파 노출에 의해 암의 진행은 관찰되지 않았다.
- 각 군에서 발생한 피부암 발생 빈도 및 크기는 <표 12>와 같다. 전자파의 병용 투여가 피부암 발생 빈도 및 크기에 영향을 주지 않았다. 병리학적 검사에 의해 암화 정도를 관찰하였는데, 이에 대한 결과도 DMBA 단독 및 전자파 병용 투여가 차이가 없었다.

IV. 결론 및 고찰

본 연구는 최소한의 영향을 미치는 환경적 전자파 노출 기준에서의 중장기 노출시 독성 평가, 임신

〈표 9〉 20kHz MF 전자파 노출 쥐의 유방암 발생

시험군(마리수)	체중(g)	암 발생률(%)	평균 종양 수	평균 종양 부피 (mm ³)
대조군(20)	286.36±28.92	0	0	0
전자파 노출군(20)	307.82±21.30	0	0	0
DMBA(24)	281.6±24.71	67	2.5±1.8(1~6)	3980±7487
DMBA+전자파(23)	312.00±20.92	74	2.6±1.4(1~5)	2499±3220

〈표 10〉 20 kHz MF 전자파 노출 시 유방암의 조직 병리학적 소견

분류	I	II	III
DMBA	17	4	3
DMBA+전자파	16	5	3

I; 암세포가 고형 부분 전체의 25 % 이하인 경우, II; 암세포가 전체의 25 % 이상 75 % 이하인 경우, III; 암세포가 전체의 75 % 이상을 차지한 경우로 분류함.

〈표 11〉 20 kHz MF 전자파 노출 마우스의 폐암 발생률 및 빈도

시험군(마리수)	체중 (g)	암 발생률 (%)	평균 종양 수
대조군(40)	32.9±54.70	0	0
전자파(40)	31.87±4.33	0	0
BP(40)	33.18±4.78	55	1.2±2.3
BP+전자파(40)	33.51±4.18	52.5	1.1±1.7

〈표 12〉 20 kHz MF 전자파 노출 시 피부암 발생률 및 빈도

시험군(마리수)	체중 (g)	암 발생률 (%)		개체별 발생 종양 수
		> 5 mm	< 5 mm	
대조군(20)	46.86±7.23	0	0	0
전자파(20)	45.61±5.36	0	0	0
DMBA(20)	47.73±7.14	0	0	0
DMBA+전자파 (20)	43.47±6.92	0	0	0
DMBA+TPA (20)	39.64±5.22*	75(15/20)	100(20/20)	1.35±0.86
DMBA+TPA+전자파(20)	44.04±6.86	68(13/19)	94(18/19)	1.00±0.0

* 대조군과 비교하여 통계적 유의성 ($p < 0.05$)을 가짐.

중에 미치는 영향을 관찰, 암 발생에 미치는 영향 및 그에 관한 기전 연구를 수행한 것으로 노출 전자파 강도(6.25 μ T)는 일반인의 노출 기준치를 근거로 한 것이다. 실험에 사용되는 전자파 세기는 일반 노출보다 2배 이상 높은 용량에 노출되는 조건에서의 영향을 관찰하는 것이 상례이다. 그러나 본 실험은 일반 작업자들의 상용 노출 조건에서의 영향을 관찰함으로써 최소한의 영향을 배제할 수 있는 자료가 될 것으로 보며, 향후 높은 세기에서의 영향을 관찰하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

12개월 및 18개월 노출한 장기간 노출 독성 실험 결과, 20 kHz 몇몇 면역 세포에서의 이상 현상을 관찰하여 이에 대한 세밀한 연구가 추후 더 필요할 것으로 사료된다. 현재 30 μ T의 직업인 노출 한도에서 재실험이 진행 중에 있어 이에 대한 결과가 나오면 영향의 유무가 정확히 판단될 것으로 사료된다.

암 발생에 미치는 영향에 대해서는 유방암, 폐암 및 피부암에 대한 영향을 평가하였고, 본 연구 결과, 전자파 노출에 의해 유의한 변화를 관찰하지 못했다. 따라서 강도를 더 높여서 실험을 수행하여 재평가를 수행할 필요가 있다.

이상의 연구 결과, 20 kHz 최소한의 영향을 미치는 환경적 전자파 노출 기준에서의(일반인 노출 한도인 6.25 μ T) 중장기 노출시 독성 평가, 임신 중에 미치는 영향을 관찰, 암 발생에 미치는 영향 연구를 수행한 것으로 20 kHz의 전자파의 최소한의 영향을 관찰한 것이라 할 수 있다. 현재 직업인 노출 한도(30 μ T)에 대한 장기 노출 실험 결과 및 임신 중에 미치는 영향에 대한 실험이 진행 중에 있으므로 이 결과가 나오는 즈음에는 20 kHz 전자파의 위해성 여부가 판명될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] A. Antonopoulos, H. Eisenbrandt, and G. Obe,

"Effects of high frequency electromagnetic fields on human lymphocytes *in vitro*", *Mutat Res.*, vol. 395, pp. 209-214, 1997.

[2] D. Brusick, R. Albertini, D. McRee, D. Peterson, G. Williams, P. Hanawalt, and J. Preston, "Genotoxicity of radiofrequency radiation", *Environ. Mol. Mutagen.*, vol. 32, pp. 1-16, 1998.

[3] J. E. Moulder, L. S. Erdreich, R. S. Malyapa, J. Merritt, W. F. Pickard, and Vijayalazmi, "Cell phones and cancer: What is the evidence for a connection", *Radiat Res.*, vol. 151, pp. 513-531, 1999.

[4] J. McCann, R. Kavet, and C. N. Rafferty, "Testing electromagnetic fields for potential carcinogenic activity: A critical review of animal model", *Environ Health Perspect.*, vol. 105(suppl. 1), pp. 81-103, 1997.

[5] S. Praunitz, C. Susskind, "Effects of chronic microwave irradiation in mice", *IRE Trans Biomed Electron.*, vol. 9, pp. 104-108, 1962.

[6] L. Verschaeve, A. Maes, "Genetic, carcinogenic and teratogenic effects of radiofrequency fields", *Mutat Res.*, vol. 410, pp. 141-165, 1998.

[7] S. H. Kim, J. E. Song, S. Kim, H. Oh, Y. M. Gimm, D. S. Yoo, J. K. Pack, and Y. S. Lee, "Teratological studies of prenatal exposure of mice to a 20 kHz sawtooth magnetic field", *Bioelectromagnetics*, vol. 25, pp. 114-117, 2004.

[8] S. H. Kim, J. E. Song, D. S. Yoo, Y. M. Gimm, J. K. Pack, H. D. Choi, and Y. S. Lee, "Toxicity bioassay in Sprague-Dawley rats exposed for 90 days to 20 kHz triangular magnetic field", *Bioelectromagnetics*, vol. 27, pp. 1-7, 2006.

[9] D. S. Yoo, EMF standards and researches in Korea, Proc WHO meeting on EMF biological effects and standards harmonization in asia and

oceania, Seoul, Korea, pp 73-74, Oct. 2002.

[10] H. J. Lee, S. H. Kim, S. Y. Choi, Y. M. Gimm, J. K. Pack, H. D. Choi, and Y. S. Lee, "Long term exposure of Sprague Dawley rats to 20 kHz triangular magnetic field", *Int. J. Radiat. Biol.*, vol. 82, pp. 285-291, 2006.

[11] H. J. Lee, J. J. Jang, Y. M. Gimm, J. K. Pack, H. D. Choi, S. H. Kim, and Y. S. Lee, "Lack of promotion of mammary, lung and skin tumorigenesis by 20 kHz triangular magnetic fields", *Bioelectromagnetics*, in press, 2007.

≡ 필자소개 ≡

이 윤 실



1985년: 이화여자대학교 약학대학 (약학사)

1994년: 이화여자대학교 약학대학 (약학석사, 약학박사)

1995년~1997년: 미국 NIH, NCI. Lab of Cellular Carcinogenesis (Post-Doct)

현재: 한국원자력의학원 방사선영향연구부 방사선손상제어연구팀 책임연구원(방사선영향연구부 부장겸 방사선손상제어연구팀 팀장)

[주 관심분야] 방사선생물학분야, 전자파생체영향분야

이 해 준



2001년 2월: 전남대학교 수의학과 (수의학사)

2003년 2월: 전남대학교 수의학과 (수의학석사)

2005년 2월: 전남대학교 수의학과 (수의학박사)

2005년 3월~현재: 원자력의학원 박사후

연수생