

Biologic Effect of Non-Ionizing Radiation

Seung-Jae Huh, M.D., Hong Gyun Wu, M.D.[†]

Department of Radiation Oncology Samsung Medical Center

Department of Therapeutic Radiology, Seoul National University College of Medicine[†]

비전리방사선의 생물학적 작용

허승재 · 우흥균

삼성의료원 치료방사선과, 서울대학교 의과대학 치료방사선과학교실

Abstract - The Radio-frequency electromagnetic(RFEM) spectrum is defined as waves that range in frequency from >0 to 3×10^{12} Hz. Although there are several thousands of reports that present data or opinion of the biological response to RFEM radiation, no consensus has emerged regarding thresholds and mechanisms of injury. This review presents a overview of the subject on mechanisms of interaction of RFEM fields with tissue, chromosomal and mutagenic effect, carcinogenic effects. The scope of the review is expanded to include systemic effects such as those on reproduction, growth, and development, hematological effects. Some biological end points, those with associated with behavior and cataractogenesis is discussed.

요약 - 비전리 방사선의 인체에 대한 작용은 최근 우리 주위에서 많이 사용되는 microwave, radio wave, laser, ultrasound wave, ultraviolet radiation 등의 문제가 될 수 있으며 본고에서는 주로 Radio Frequency Electromagnetic (RFEM) spectrum의 shortwave와 microwave의 생물학적인 작용을 정리 발표하고자 한다.

RFEM에 의한 carcinogenesis에 관해서는 아직 RFEM이 인체에서는 발암물질로서 작용한다는 보고는 없으나, cancer promotion에는 작용할 것이라는 보고는 있다. chromosomal effect에 관해서는 체외실험에서 microwave에 의한 chromosome의 stickiness의 증가와 mitotic index의 변화에 관한 보고가 있다. 인체에서는 RFEM에 많이 피폭되었다고 알려진 Moscow의 미 대사관 직원 5000명을 대상으로 한 역학조사에서는 특별한 염색체 이상은 발견되지 않았다. 동구에서의 보고에 의하면 RFEM에 의한 선천성 기형아의 출산이 보고된바 있으나 출산시의 통증을 줄이기 위한 2450 MHz의 microwave를 조사한 산모 2000명 출산아에서 기형은 없었다고 한다. 인간의 행동과 정서적인 측면에서 RFEM에 의한 변화는 1974년 Sadcikoda에 의해 기술된바 있는 "microwave sickness"는 irritability, 두통, 전신쇠약, 불면증, 성욕 감퇴 및 발기부전 등을 호소하는 증후군으로 주로 동유럽의 저자들에게 의하여 보고되고 있으며 구 소련에서는 microwave sickness 또는 radio wave sickness는 확실한 하나의 임상병명으로 간주되고 있다.

cataractogenesis에 관해서는 실험 동물에서 잘 연구되고 있으며, 사람에서도 1952년 레이더 작업종사자에서 보고된 이후 50여례 이상의 보고가 있으나 백내장 자체가 그 발생 빈도가 높은 질환이고 많은 원인이 있으므로 아직 인간에서의 확실한 cataractogenesis에 관해서는 더욱 연구가 필요한 분야이다. radar wave에 노출된 적이 있는 군인을 대상으로한 미 해군의 역학조사에 의하여 radar wave에 의한 uveitis, retinitis와 비진행성 백내장등이 보고되고 있으나 판 연구에서는 입증된바 없다.

서론

비전리 방사선의 인체에 대한 작용은 최근 우리 주위에서 많이 사용되는 microwave, radio wave, laser, ultrasound wave, ultraviolet radiation 등의 문제가 될 수 있으나 본 review에서는 National Council on Radiation Protection and Measurement (NCRP)의 권고를 자료로 해서 주로 radio-frequency electromagnetic (RFEM) spectrum의 short-wave와 microwave의 생물학적인 작용을 정리해 보고자 한다.

RFEM spectrum은 주파수가 0에서 3×10^{12} Hz의 파동으로 정의되는데 여기서는 3×10^6 에서 3×10^{11} 범위의 short-wave와 microwave를 다룰 것이다.

microwave spectrum의 상한에 있는 RFEM field나 더 높은 주파수의 fields에 대해서는 생물학적인 연구가 적어 여기서는 대상에서 제외되었다.

거대분자와 세포에 미치는 영향

RFEM fields가 bipolymers, cell organelles, microorganisms에 미치는 영향은 온도상승효과 외에는 특별한 것이 없다. 마찬가지로 유전물질에 대한 효과도 온도상승에 관련된 것 외에는 확인된 것이 없다. RFEM irradiation이 바이러스 증식시 대사에 영향을 미친다는 보고가 있으나 대조군에 대한 정보가 없고 0.2°C의 온도차에서도 성장에 큰 영향을 미친다는 Blackman 등의 보고를 고려한다면 이 결과는 신중하게 해석해야 할 것이다.

한가지 확실한 것은 실험을 하거나 데이터를 분석하는데 있어서 field의 강도에 관계없이 온도가 결정적인 변수라는 것이다. 실험조건과 이용된 분석의 정확한 기술에 있어서 적절한 온도의 대조군을 이용하는 것이 중요한 문제일 것이다.

high power density에서 RFEM fields의 열효과에 대한 증거는 풍부하다. Blackman 등은 적은 온도의

변화도 세포에 큰 영향을 미친다고 보고한 바 있다. 그러나 제대로 관리 통제되어 시행된 실험에서 더 많은 데이터가 나온 후에야 low power densities의 microwaves가 세포에 미치는 영향에 대한 결론을 내릴 수 있을 것이다.

발암작용

사람이나 실험물에 있어서 RFEM가 발암 위험을 증가시킨다고 증명된 바는 없다. low intensity field에서 발암성이 있다는 주장이 있어왔으나 아직 입증된 바는 없다.

미국 해군병사들과 직업상의 이유로 중간강도의 microwave radiation에 노출된 사람들을 대상으로 후향적 역학 조사를 실시한 결과 통계적으로 유의한 발암율의 차이를 찾을 수가 없었다.

Szmigielski 등은 BALB/C mice에서 국소적으로 1% 3, 4-benzopyrene을 발라서 유발시키는 피부암에서 power density 5 또는 15 mW/cm², 2.45 GHz CW field에 노출되면 생존기간이나 발암의 잠복기가 줄어든다고 보고하였다. 또한 3,4-benzopyrene으로 처리하기 전에 RFEM에 노출되면 피부암 발생에 영향을 준다고 보고하면서 어떤 조건하에서 microwave에 노출되면 암성장 촉진제로 작용할 수 있다고 해석하였다. 자연적으로 발생한 쥐의 유암에서도 microwave에 노출된 경우 암성장의 촉진과 생존기간의 감소가 보고된 바 있다. 암 성장 촉진과 생존기간 감소의 정도는 노출된 양에 의존한다.

RFEM 노출에 의한 암 유발에 관한 자료는 매우 적다. 발견할 수 있는 정도의 염색체 손상이나 유의한 수준의 돌연변이를 증가시키려면 1mW/cm² 이상의 power density가 필요하다고 알려져 있다. 따라서 사람에게 있어서 low intensity RFEM fields에서는 암발생율이 증가하지 않는다고 잠정적으로 결론지을 수 있다. 그러나 현재의 자료가 대부분 단기간 노출에 대한 효과에 국한되었고 제한된 종의 동물

에서 제한된 관찰기간 동안 이루어진 것이므로 이 결론은 제한적인 것이라고 할 수 밖에 없다.

RFEM fields에 노출되면 신경계, 면역계, 생화학 적, 혈액학적, 유전적, 발생학적, 신경내분비학적으로 다양한 효과를 보인다. 이런 효과들이 암유발에 직접적으로 관계가 있는지는 확실하지 않으나 이러한 변화는 생리적인 스트레스와 연관되 있기때문에 어떤 조건하에서 RFEM fields에 노출되면 직접적으로나 간접적으로 발암에 관계가 있을 것이라고 제시 되어왔다. 지금까지 적절한 크기의 표본을 대상으로 적절한 기간 동안 관찰한 데이터가 없기때문에 현 시점에서 사람이나 실험동물에서 암발생율의 빈도가 증가한다는 데이터가 없는 것은 결정적이지 아니하다.

생식 성장 발육에 미치는 영향

사람에 있어서 자궁내 피폭 후 기형아의 출산은 몇몇 보고외에는 증거가 없다. 낮은 레벨의 장기간 피폭의 태기형작용 (teratogenic effect)에 대한 연구가 몇몇 있으나 결정적이지 못하다. 1965년 Baltimore에서 시행된 Down씨 증후군에 대한 환자 대조 연구에서 몽골리즘 환자의 아버지에 직업적으로 레이다에 노출된 과거력이 더 많다는 것이 밝혀졌다. 그러나 그 차이는 통계적으로 유의하지는 않았다. 1977년에 레이다 노출에 관한 더 많은 정보와 군복무자료를 더욱 보충하여 이 결과를 재검토하였으나 같은 결과에 이르지 못하였다.

분만시 자궁수축의 통증을 완하시키기 위한 shortwave and microwave diathermy의 사용은 1973년 벨기에에서 보고된 후 의학적으로 이용되고 있다. 최근에 보고된 shortwave equipment에 의한 물리치료기사의 직업적 피폭에 대한 연구에서는 여성 물리치료기사의 자녀에서 선천성 기형의 증가의 가능성을 제시하고 있다.

백내장 발생

백내장은 인간이 RFEM에 노출될 때 가장 뚜렷하게 나타나는 비가역적인 효과이다. microwave frequency에서 RFEM 에너지의 흡수는 실험적으로 안구조직에 손상을 초래한다. 제한된 신진대사능력을 가진 유사분열 후의 세포에서 나온 수정체 섬유의 손상이 망막앞의 안구구조의 투명성으로 쉽게

관찰이 가능하기 때문이다.

대부분의 경우에 있어서 인간의 백내장을 일으킬 power-density thresholds를 결정 할 노출 조건에 대하여 충분한 정보를 얻기는 거의 불가능하다. 마이크로파에 의한 백내장화의 첫 예는 1952년 에 보고 되었는데 20세의 레이더 작업자였지만 노출에 대한 세부사항은 없었다. Hirsch와 Parker는 간헐적으로 0.2에서 3GHz의 주파수에서 방사선에 1년이상 노출된 32세 작업자에 생긴 양안의 백내장을 보고하였다. 100mW/cm² 혹은 그 이상의 fields에 다양한 기간의 노출로 좌안에서 맥락막염, 초자체혼탁과 방성과 초자체액의 세포 찌꺼기가 나타나는 것외에 양측성의 핵 및 후피막하 백내장이 초래되었다. 좌안을 외과적으로 적출후에 Hirsch에 의해 재 검사되었는데 좌안에서는 포도막염과 맥락막 망막염, 우안의 수정체에서는 진행되지않은 백내장이 나타났다. 여기서 노출 주파수는 4내지 5GHz의 범위였고, power density의 범위는 40에서 380mW/cm² 으로 재평가되었는데 이는 1.16W/cm² 정도의 높은 강도에서 near field exposure한 경우와 비슷하다.

RFEM fields에 직접적으로 노출시 안구에 미치는 영향을 평가하는데 역학적인 방법이 이용되었다. Cleary와 Pasternack에 의해 시행된 군대와 공장 노동자들의 미약한 혹은 비백내장적 변화에 대한 후향적 연구에 의하면 나이를 맞춘 대조군에 비해 그러한 결함의 발생률에 있어 노출에 연관된 명백한 증가를 나타낸다. 가장 통계적으로 유의한 발견은 인부들의 수정체의 후극 지역에 약간의 결함 발생율이 증가하고 있다는 것이고, 이는 작업의 특수화에 연관된 것처럼 보인다. 일반적으로 연구에 고용된 개개인에서 다른 직업부류보다 이러한 변화의 발생률이 더 높다는 것이다. 비백내장적 변화의 발생률은 몇개의 노출 매개변수에 연관되어 있다. 그러나, 인부들과 대조군에서 수정체 결함의 가장 중요한 연관성은 개개인의 나이인데, 나이가 증가할 수록 발생하는 결함의 평균치는 직선으로 증가할 정도이다. 이 연구의 결과는 Cleary와 Pasternack에 의해 RFEM fields에 직접적으로 노출되는 것은 수정체의 노화율을 증가시킨다고 해석되었지만, 이연구가 백내장의 발생률을 평가하는데 고안된 것이 아니기 때문에 다른 수정체의 결함의 발생률과 백내장의 발생률사이에 어떤 연관을 이끌어낼 수는 없다.

직업적인 RFEM field의 노출과 안구 변화의 관계

에 대한 역학적인 연구는 어떤 해로운 효과의 증거를 보여주지 못했다. 만약 그런 환경에서 인간의 노출이 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 이하의 power density에 제한된다는 가정이 성립된다면 이 density가 마이크로파 fields에 간헐적인 노출로 인한 안구손상의 실질적인 제한점이 된다고 가정할 수 있을 것이다. 이러한 형태의 데이터를 해석함에 있어서 피할 수 없는 제한 즉, 노출된 경력의 불충분성 그리고 실제로 안구의 병리를 경험한 사람을 직장을 그만두게 하는 그러한 편제 효과등이 있을 수 있는 이러한 제한은 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 범위의 power density에 인간을 장기간 직업적으로 노출시켜도 어떠한 정도의 안구 변화도 생기지 않는다는 결론을 내리지 못하게 한다.

조혈 면역계에 미치는 영향

동물실험에서 non-thermogenic level의 RFEM field에 노출되면 조혈계, 면역계에 명백한 영향을 미친다는 몇 보고가 있다. 어떤 피폭 조건하에서, 특히 pulsed fields에서, 일관된 영향은 임파구의 분포에 관한 것이다. B-임파구 분획이 증가된 임파구 증식증을 관찰할 수 있다. 몇몇 연구자에 의해 보고된 이 효과는 피폭된 쥐에서 보이는 증가된 혈구응집 반응과 일치한다. B-임파구는 일차적으로 체액 면역 반응에 관계하므로 그러한 강화된 반응을 예측할 수 있다.

세포매개 면역반응에 대한 적절한 정밀한 체내 분석은, Ragan의 $10\text{mW}/\text{cm}^2$ 이하에서는 일관된 효과가 없다는 것외에는 보고된 바가 없다.

위험성 평가를 위하여 non-thermogenic RFEM 피폭시 면역적격성에 대한 적절한 체내분석이 요구된다. Szmigielski의 연구에 의하면 RFEM 피폭이 토끼에서 과립성 백혈구의 기능이 약화시키지는 않으나, thermogenic level에서는 쥐에서 viral infection에 대한 반응의 정도를 약화시킨다고 하였다.

Smialowicz 등, Liburdy, Ragan 등은 쥐에 non-thermogenic RFEM을 피폭시켜 세포매개 면역 체액성 면역 모두에 이상이 없다고 하였다. 이 중 흥미로운 사실은 Liburdy의 실험에서 그는 thermogenic RFEM 노출후 glucocorticosteroid 주사에 대한 반응을 비교했을 때 비슷한 면역변화와 임파구 효과를 관찰하였다.

very low-dose RFEM 피폭이 적혈구 생산의 저하를 가져온다는 유일한 증거는 Siekierzynski의 토끼

에서 혈장 철 제거율이 낮아지고 발육하는 적혈구의 철결합이 감소된다는 보고이다.

세포 수준에서의 기전을 이해하지 못한다면, 비전리방사선(NIR) 피폭효과가 이상적인 실험 디자인하에 여러 연구실에서 발견되더라도 그것을 유추하고 사람에서 잠정적으로 유해하다고 해석하기는 어려울 것이다.

내분비계에 미치는 영향

RFEM fields 피폭이 내분비 기능에 주는 영향은 급성반응 만성반응 모두 대체로 비슷한 양상을 보인다. 급성반응은 부신피질자극성 호르몬 분비가 증가하고 갑상선자극성 호르몬 분비는 감소하며 성장 호르몬 분비는 감소한다. 이 시상하부 호르몬 분비의 변화는 스트레스에 대한 반응과 같다. 체내 호르몬의 변화는 생리적으로 중요하기때문에 RFEM의 만성 피폭, 반복 피폭 실험시 충분한 배려를 한다면 위험 평가 기준으로 이용될 수 있을 것이다.

어떤 연구자는 내분비에 관련된 변화는 시상하부나 아니면 현재 연구중인 특정한 내분비선 또는 특정한 말단기관과 열반응의 결과로 시상하부-뇌하수체 체계를 자극함으로써 생기는 것으로 믿고 있다. 다른 연구자는 이 변화변화는 RFEM과 중추신경계가 직접 반응하는 것으로 해석하고 있다.

코르티코스테론과 성장호르몬의 혈장농도 변화는 비특이적 스트레스에 대한 전형적인 반응으로 볼 수 있다. 따라서 RFEM의 내분비계에 대한 영향을 연구할 때 호르몬 레벨의 변화가 실험동물의 조작이나 환경의 변화에 의해 일어나지 않도록 신중을 기해야 할 것이다.

스트레스와 적응이라는 면에서 새로운 환경이나 새로운 조작은 불안조성, 회피행동, 체중감소 등 동물의 행동양상을 변화시킬 수 있다. 따라서 RFEM 피폭에 대한 신경내분비반응의 실험은 주의해서 디자인해야하고 환경조건에 적절히 적용된 동물에서 시행해야 할 것이다.

지금까지 나온 RFEM 노출에 관한 데이터를 주의해서 조사하고 분석하면 체온의 상승이나 체내 온도 경사의 변화에 대한 생리적 조절에 신경내분비계가 일관되게 관여하고 있음을 난타낸다. RFEM의 신경내분비계에 대한 영향을 결론내리기 전에 에너지 분포 양상과 이에 대한 급성 반응 등을 결정하기 위한 여러 level에서의 피폭의 연구가 필요

할 것이다.

현재로서는 4W/kg 미만의 Specific Absorption Rates(SARs)는 쥐에서 병리생리적 장애를 일으킨다는 믿을 만한 증거는 없다. 사람의 감수성도 비슷하다고 가정하면 평균 0.4W/kg 미만의 SAR에서 내분비장애는 일어나지 않을 것이다.

심혈관계에 미치는 영향

RFEM 피폭이 분리된 심장의 심박동수에 미치는 영향은 심근세포나 심박조율기 세포에 직접 영향을 미치는 것이 아니라 잘려나간 신경말단에서 분비되는 신경전달물질에 의한 것으로 보인다. 체내 심장에는 피폭시 어떤 효과도 관찰되지 않았다. 유의한 정도의 발열을 일으키는 레벨에 몸 전체 또는 일부를 노출시키면 에너지 분포는 다르지만 몸을 가열했을 때와 유사한 심혈관계 반응을 보인다. 낮은 레벨의 fields(<10mW/cm² or <2 W/kg)에서는 단기간 노출되어도 심혈관계에 미치는 효과는 없는 것으로 알려져 있다. 장기간 노출에 대한 자료는 거의 없거나 있어도 서로 상반된 결과를 보이고 있다.

혈뇌장벽 (Blood Brain Barrier, BBB)과의 작용

BBB를 하나의 구조물로 본다면 적어도 현재까지 연구된 RFEM 주파수 내에서는 weak RFEM field가 나쁜 방향으로 작용한다는 증거는 없다. 그러나 BBB를 압력과 온도의 변화에 따라 물리적 생리적으로 변하는 하나의 기능적인 단위로 보면 RFEM field에 취약하다. 즉 BBB는 적어도 측정할 수 있는 정도의 온도 변화를 유발하거나 혈압 혈류 변화를 유발시킬 수 있는 field에 대해서는 민감하다고 볼 수 있다.

중간강도의 RFEM field에서 BBB의 tight junction의 통합성이 소실된다는 실험적인 증거는 없으나 이것만으로 비교적 약한 RFEM field에서 중추신경계의 기능이 변화할 수 있다는 염려를 완전히 배제할 수는 없다. 그러나 이러한 염려에 대하여 두가지 반론이 있다. 한 가지는 35 mW/cm²까지의 범위 내에서 일어나는 BBB의 변화는 실험동물에서 수영, 약간의 금식 등의 스트레스에 대한 변화보다 크지 않다는 사실이며, 두번째는 BBB의 변화는 실험동물에서 수영, 약간의 금식 등의 스트레스에 대한 변화보다 크지 않다는 사실이며, 두번째는 BBB의 해부학

적인 붕괴시키는 치명적인 fields에 짧은시간 노출된 후 살아남은 실험동물에서 지속적인 신경학적 증상이나 행동의 이상을 보이지 않는다는 사실이다. 따라서 약하거나 중등도로 강한 field에 짧은 노출이 BBB의 변화를 가져왔다는 연구중에 비가역적인 물리적인 변화를 일으켰다는 보고는 하나도 없다고 볼 수 있다.

중요한 것은 아직까지 신경순환계와 이와 관련된 것에 대해 제대로 관리되고 장기간 노출에 의한 영향에 대한 연구가 없다는 것이다.

정신 행동에 미치는 영향

몇몇을 제외하고 중추신경계의 기능적 장애는 무력증 또는 신경무력증후군으로 불리는 radiowave sickness의 일종으로 기술되었다. 이 임상증후군은 대개 노출이 중단되면 증상이 소실되는 것으로 보고됐다. 흔하게 보고되는 다른 증상은 서맥, 동맥성 고혈압, 심전도의 변화 등을 포함하는 심혈관계의 기능적 변화이다. 이런 신경순환 무력증은 신경계의 영향으로 볼 수도 있다. 흔하지 않으나 좀 더 심각한 신경학적 내지 신경정신적 장애로 간뇌증후군이 있다. 신경무력증상에 대하여 미국에서 시행된 유일한 역학적 조사는 소련과 다른 동구권 대사관 직원을 비교한 것인데 여러 증상이 나타났으나 그 이유가 RFEM때문이라는 증거는 찾을수 없었다.

유고슬라비아에서 시행한 직업 보건 연구조사에서 레이더기지 작업자와 비레이더기지 작업자의 중추신경계와 심혈관계에 관한 주관적 증상을 비교하였다. 두통, 피로감, 불안감, 수면장애, 성욕감퇴, 기억력 장애에 대하여 비교하였는데 레이더기지 작업자에서 두통, 피로감, 불안감이 더 흔한 것으로 나타났다. 그러나 이것은 소음, 어두운 조명, 항상 레이더 스크린에 주의해야 하는 점, 불충분한 환기 등 좋지않은 작업환경에 기인한 것으로 나타났다.

잘 정의되지 않고 비특이적인 복합 증상을 찾아내고 평가하는 것은 매우 어렵다. 앞으로의 연구에서는 이학적 검사와 더불어 행동과학자, 정신과 전문의와의 자문도 필요할 것이다.

결 론

위에서 본 바와 같이 RFEM fields의 생물학적 영향에 대해서 많은 과학잡지, 연구논문, 관련서적이

있으나 수 watt per kilogram(W/kg)이하에서의 SARs에 대해서 역치나 손상의 기전에 대하여 합의가 이루어진 바는 없다.

지역이나 나라마다 다른 다양한 RFEM-radiation 노출기준을 보더라도 이러한 합의의 부재를 알 수 있다.

따라서 과학적 문헌의 객관적 분석과 적절한 자격을 가진 편견이 없는 전문가에 의한 노출제한에 대한 권고가 필요할 것이다.

참고문헌

1. NCRP Report No. 86. (1986). Biological Exposure Criteria for Radiofrequency Electromagnetic Fields. Recommendations of the National Council on Radiation Protection and Measurement. Washington, D.C., U.S.A.
2. International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection Association. Interim guideline on limits of exposure to 50-60 Hz electric and magnetic field. *Health Physics* **58**, 1, 113-122, (1990).
3. International Non-Ionizing Radiation Committee of the International Radiation Protection 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).