

전자파 노출에 따른 생물학적 영향에 관한  
최신 고찰과 전망

김주환\* · 조성완\*\* ·  
김명주\* · 김학림\*

\*단국대학교, \*\*건양대학교

I. 서 론

지구에는 태양으로부터 발생하는 태양풍(solar wind)이 지구 내부(inner core)와 만남으로써 지구 표면에는 항상 자기장(geomagnetic field)이 존재한다. 따라서 지구상에 존재하는 모든 생명체는 늘 이런 자기장(magnetic field)의 존재 하에 생명을 유지하고 있다(Hollenbach et al., 2010). 이러한 지구 자기장 외에 1887년 독일의 물리학자 하인리히 헤르츠(Heinrich Hertz)가 인공적으로 전자기파(Electromagnetic Fields: EMFs)를 만들어 이 전자기파의 존재를 증명하였고, 이후 폭발적인 과학기술적 진보에 따라서 수많은 전기 전자제품의 개발과 더불어 통신 기술을 발달시켜 왔다. 이러한 기술 발달로 인해 현대사회를 유지하기 위한 전력수요는 계속적으로 증가하고 있으며, 특히 현대인에게 필수품이 되어 버린 컴퓨터, 스마트 폰과 같은 IT 무선 통신 기술 발달로 인류를 포함한 모든 생명체는 이전에 경험하지 못했던 많은 인공적인 전자파(EMFs)에 항시 노출되는 환경적 변화를 경험하고 있다. 현재, 전자파의 생체에 미치는 영향은 상반되는 여러 연구 결과 보고들이 보고됨에 따라서 많은 논란이 되고 있으나, 세계보건기구(WHO) 산하 국제 암 연구기구(IARC)에서는 극저주자기파(ELF-MF)와 무선파 전자파(RF-EMF)를 발암인자(carcinogenic) 즉 발암유도 가능물질로 분류하여 위험성을 알리고 있다(Baan et al., 2011). 따라서 본 논문에서는 전자파의 노출에 따른 생물학적 영향에 대한 최신의 발표들을 정리하고, 앞으로의 전망에 대하여 소개하고자 한다.

II. 전자파 노출에 따른 생체의 영향

전자파는 파장의 범위에 따라 극저주파(Extremely Low Frequency: ELF), 무선파(Radio Frequency Radiation: RF), 마이크로

로파(Microwave Radiation)로 분류할 수 있다. 일반적으로 극저주파(ELF)는 3~3,000 Hz 범위의 주파수(frequency)로 가정과 직장에서 고압전선(high voltage power lines)에 의해 발생된다(Barr et al., 2000). 무선파(Radio Frequency: RF)는 3 kHz에서 300 GHz까지의 범위의 전자기파(EMF)로써 무선 주파수 전류가 안테나에 공급되었을 때, 공간을 통해 전파되는 전자기장을 발생시킨다(Stan, 2002). 무선파(RF)는 무선전화기나 휴대전화, WiFi 시스템, 위성통신 시스템, 라디오 및 TV 방송국, 그리고 쌍방향 무전기 등은 무선파 스펙트럼 내에서 작동하며, 이러한 무선 통신 장비들은 계속적으로 인간의 실생활 속에서 사용이 증가하고 있다. 현재 많은 논란이 있지만 많은 전자파 연구는 암(cancer), 유전자 손상(genetic damage), 신경계질환(neurological disease), 생식 장애(reproductive disorders), 면역 장애(immune dysfunction), 신장 손상(kidney damage), 전자파 과민증(electromagnetic hypersensitivity), 인지적 영향(cognitive effects), 단백질 및 펩타이드 손상(protein and peptide damage) 등이 무선 전자파(RF-EMF)의 노출과 상관관계가 있다고 보고하였다(Morgan et al., 2015). 또한 여러 역학연구에 의하면 극저주자기파(ELF-MF)와 전자파(EMF)에 만성적으로 노출된 어린이에게서 소아백혈병(Childhood Leukemia)이 발병이 되고, 성인에게서 뇌종양과 백혈병(Leukaemia)의 발생 가능성이 있음을 보고하였다(London et al., 1991; Savitz et al., 1988). 그러나 다른 연구발표에 의하면 전자파(EMF) 노출에 따른 소아백혈병 발병의 증가요인의 직접적인 연관성을 찾지 못하였으며(Jirik et al., 2012; Leitgeb et al., 2011; Linet et al., 1997), 또한 가정에서의 자기파(MF) 노출에 의한 소아의 급성 림프구성 백혈병(Acute Lymphoblastic Leukemia)과의 직접적인 연관성을 확인하지는 못했다(Linet et al., 1997).

더욱이 휴대폰을 주로 사용하는 위치와 뇌신경계의 근접성 때문에 전자파 노출에 따른 결과로서 다양한 뇌신경학적

인 영향들이 일어나는 것이 가능할 것이라 가정해왔다. 이러한 뇌신경학적 이상에는 두통(Frey, 1998), 수면습관의 변화(Wagner et al., 1998) 그리고 뇌파의 변화(Mann et al., 1998) 등이 포함되었으며, 혈압의 변화 또한 보고된 바 있다(Braune et al., 1998). 이밖에도 무선 전자파(RF-EMF)에 의한 두통, 떨림, 현기증, 기억력 감퇴, 집중력 감소와 수면 장애와 같은 신경학적 인지 장애(Neurological cognitive disorders)는 여러 역학 연구에 의해 유의한 통계적 결과들이 보고되었다(Santini et al., 2002; Abdel-Rassoulet et al., 2007; Hutteret et al., 2006; Kolodynskiet al., 1996). 또한 어린이의 휴대 전화 사용으로 인한 전자파(RF-EMF) 증가가 주의력 결핍 과잉 행동 장애(Attention Deficit Hyperactivity Disorder: ADHD) 증상의 위험과 관련이 있음을 시사하였다(Byun et al., 2013).

스웨덴의 룬트대학 연구진은 흰쥐(rat)의 뇌에 대한 마이크로파 노출효과를 연구하여(Van and Nina, 2012), 휴대전화의 GSM 900 MHz RF EMFs를 흰쥐에 노출하였을 때 독소와 미생물이 뇌 세포에 들어가지 않도록 격리시키는 역할을 하는 혈액-뇌 장벽(blood-brain barrier)을 통해 뇌에 알부민(albumin)이 누출되는 것을 발견했다(Salford LG, 2008; Nittby, 2009). 그러나 다른 *in vitro* 연구(GSM 1,800 MHz)와 어린 쥐의 연구(1439 MHz EMF)에서는 위와 같은 결과를 얻지 못했다(Franke et al., 2005; Kuribayashiet al., 2008). 또한 RF EMFs에 노출된 설치류에서 대뇌피질(cortex), 해마(hippo-campus) 그리고 기저핵(basal ganglia)에서 신경 세포의 손상에 대한 유의한 증거를 제시했다(Salford LG et al., 2003).

더 나아가 많은 관심은 전자파의 노출에 따른 뇌 신경계의 발암 가능성에 대한 우려인데, 최근의 연구들은 뇌암과 휴대폰의 사용(Benson et al., 2013) 또는 근처 휴대폰 기지국(Stewart et al., 2012)과의 관련성은 없다고 보고하였다. 또한 영유아들의 암과 모체가 임신시의 휴대폰 기지국 노출 위험 사이의 관련성도 없었다(Elliott et al., 2010). 이런 관점에서 현재까지 관찰된 결과에 따르면 전자파와 뇌신경계 발암성과의 관련성은 넓은 범주의 많은 혼란변수에 의해 복잡하게 연결되어 있음을 제시하고 있고, 지금까지의 연구 결과들에서는 전자파 노출에 따른 발암성의 증가 사이의 인과관계를 증명할 수 있는 명확한 증거들은 없는 실정이다(Moulder et al., 2005).

### III. 전자파 노출과 유전독성(Genotoxicity) 및 발암

전자파의 노출에 따른 유전독성 효과(Genotoxic effects)는 현재까지 수많은 자료들이 보고되었다. 무선 전자파(RF-EMF)에 노출된 세포들에서 다양한 형태의 유전독성 영향이 나타난다는 무시할 수 없는 많은 증거 자료가 있다. 그러나 또한 유전독성에 대한 전자파의 영향은 상반된 결과도 많이 보고되고 있다. 전자파(RF)가 DNA 손상을 일으킨다는 결과를 살펴보면 신경세포에 전자파(1,800 MHz, SAR 2 W/kg)의 노출은 미토콘드리아에서 DNA 산화적 손상을 야기하며(Xu et al., 2010), 또한 다양한 범위의 전자파에 노출된 림프세포에서 DNA 절편(DNA fragmentation)과 DNA 구조의 깨짐(DNA Strand Breaks) 현상이 보고되었다(Phillips et al., 2009). 그밖에 염색체 불안정성(chromosomal instability), 유전자 발현의 변화(alteration of gene expression), 유전자 변이(gene mutations) 등을 일으키는 것으로 보고되었으며, 이런 유전적 독성 효과는 뉴런(neurons), 혈액 림프구(blood lymphocytes), 정자(sperm), 적혈구 세포(red blood cells), 상피 세포(epithelial cells), 조혈 조직(hematopoietic tissue), 폐 세포(lung cells), 골수(bone marrow) 등에서 발생하는 것으로 보고되었다(Xu et al., 2010; Phillips et al., 2009; Ruediger et al., 2009; Zhao et al., 2007; Lee et al., 2005; Demisia et al., 2004; Lai et al., 2004; Mashevich et al., 2003; Magras et al., 1997; Baan et al., 2011). 또한 전자파(RF) 노출에 의해 염색체 이수성(aneuploidy)의 발생이 증가되는 것이 발견되었다(Mashevich et al., 2003). 염색체 이수성(aneuploidy) 현상을 포함한 유전적 독성 효과는 비정상적인 유전자 형성으로 유전적 장애를 일으키고, 더 나아가 암을 유발할 수 있다(Hoeijmakers, 2009). 또한 전자파의 폭로는 악성 뇌 종양(malignant brain tumors)에 대한 위험 증가와 관련이 있는 것으로 나타났다(Hardell et al., 2005). Hardell 등이 2007년에 발표한 역학조사에 의하면 10년 이상 하루에 한 시간 휴대 전화 사용은 종양 위험을 증가시킨다고 주장했다(Hardell et al., 2007). 또한 휴대 전화 사용자에서는 악성 신경 교종(malignant gliomas)의 위험이 증가하며, 특히 청신경종(acoustic neuromas)과 더 높은 연관성이 있다고 하였다. 그 외 많은 연구에서 휴대 전화 전자파(RF-EMF)와 뇌종양(brain tumor) 사이에 연관성이 보고되었으나, 아직까지 많은 논란이

되고 있다(Myung et al., 2009; Swerdlow et al., 2011; Repacholi et al., 2012). 이러한 논란에도 불구하고, 세계보건기구(WHO)가 전자파(RF-EMFs)를 잠재적 발암원(carcinogen)으로 분류하고 있다(Ban et al., 2011). 이는 납, 매연, 클로로포름 등과 같은 등급으로 암을 증가시킬 수 있다고 경고하고 있다. 전자파를 발암원으로 분류하는 것에 대해서는 아직까지 과학자들 간에 명확한 결론을 내리지 못하고 있다. 이는 1980년대부터 등장한 휴대전화가 본격적으로 사용된 것은 불과 20년여만에 지나지 않기 때문에 그 연관성을 보기까지 수십년의 노출과 이에 대한 역학적 분석이 필요하기 때문이다.

#### IV. 전자파 노출과 기억력

공공환경에서 흔하게 접하는 마이크로파의 노출 수준이 건강에 해로운 것으로 밝혀진 것은 없다는 보고가 있었지만(Repacholi, 1998), 전자파의 뇌신경학적 영향에 대한 걱정들이 많은 관심을 받으면서 휴대폰의 사용에 의한 기억력 상실 가능성에 관한 실험 연구 보고들도 있다. 동물에서 무선 주파수 EMF(300 GHz~0.1 MHz)가 인지에 미치는 영향에 초점을 맞춘 연구(Lai et al., 1994)에서는 45분 동안 2.45 GHz의 EMF(초당 500 펄스, SAR 0.6 W/kg)에 전신 노출시켰을 때, 공간 기억력을 측정하는 12 방향-방사상 미로시험(12-arm radial-maze test)에서 학습이 지연되었음을 보고하였다. 이러한 연구 결과는 1 시간 동안 약간 더 큰 SAR(1.2 W/kg) EMF 조건에서 공간 기억 프로세스의 교란에 민감한 테스트인 물-미로 시험에서 증명한 실험(Wang and Lai, 2000)으로 더 확장되었다. 비록 위의 두 연구는 의심할 여지없이 EMF가 건강과 뇌 기능에 위험이 될 수 있음을 제시하였지만, 이러한 연구 결과를 확인하는 것을 목표로 한 다른 2개의 12 방향-방사상 미로시험(Cassel et al., 2004; Cobb et al., 2004) 등에서는 Lai 등(1992)이 보고한 이전 결과를 재현하여 확인할 수 없었다. 따라서 전자파의 기억력에 대한 영향은 아직까지 불분명한 상황이며, 뇌신경계에 대한 영향과 관련하여 두통의 유발 가능성과 같은 경우, 전자파와 마이크로파에 오랜 직업적 노출과 두통의 발생이 관련을 가진다고 하지만, 많은 초기의 전자파에 노출되는 직업군에서 보고되는 많은 불평들은 주관적인 것들로써 직업스트레스, 나쁜 작

업과정, 가정문제 등에 기인한 것으로 보인다(Repacholi, 1998).

#### V. 전자파 노출과 혈액-뇌 장벽의 투과성 변화

전자파의 노출에 대한 스트레스와 불안(Millan, 2003)과 관련된 이전 연구에서 전자파(EMF)에 노출되면 때때로 스트레스가 유도되는 것이 보고되었고(Ray and Behari, 1990), 또한 스트레스가 공간 메모리 수행을 방해할 수 있는 것도 알려졌다(Micheau and Van Marrewijk, 1999). Lai 등(1992)이 또한 흰쥐의 뇌에서 스트레스와 불안(Millan, 2003)에 관련된 벤조다이아제핀(benzodiazepine) 수용체에 대한 전자파의 영향을 조사하여 뇌의 겔질에서 이 수용체들이 증가되는 것을 발견하였다. 또한 전자파 노출에 따른 불안에 관한 효과도 전자파 노출에 의한 혈액-뇌 장벽의 투과성 증가에 따른 영향에 의한 것으로 고려할 수 있어(Hossmann and Hermann, 2003), 이 혈액-뇌 장벽의 완전성에 관한 전자파의 직접적인 효과에 대한 가설로써, 전자파로 유발된 혈액-뇌 장벽의 투과성 변화 효과를 스트레스 또는 불안으로 설명하는 것을 포괄할 수도 있다.

전자파 노출에 따른 불안 발생에 대한 연구는 설치류 동물 모델에서 가장 잘 알려진 불안 동물 모델 중 하나인 십자형 높은 미로(Elevated Plus Maze: EPM)를 사용해 측정한다(Handley and Mithani, 1984; Rodgers and Dalvi, 1997; Wall and Messier, 2001). 이 모델은 실험동물이 새로운 환경을 탐색하려는 경향과 밝은 빛과 열려있는 공간을 회피하려는 경향 간의 밸런스에 기초한 것이다. 미로는 십자 형태로 서로 마주 보며 열려있는 두 개의 통로와 사방이 막혀있는 두 개의 통로로 구성되어 있으며, 바닥으로부터 약 70 cm 정도 높이로 떨어져 있다. 일반적으로 불안증의 정도가 높을수록 열려있는 공간을 회피하고 닫힌 공간으로 들어가려는 경향이 강하게 나타나는데, 이 반응은 불안을 나타내는 것으로 해석한다. 불안은 오픈/총통로 입장 비율이 0.5보다 더 작은 경우 불안 경향을 뜻한다. 반대로, 항불안 약물은 이 비율을 증가시켜서 0.5에 이르게 하고, 이는 오픈 통로에 대한 두려움이 줄어들었다는 것을 뜻하게 된다. 항불안제나 불안을 야기하는 약물뿐 아니라, 몇 가지 요소들 또한 이 장치의 행동 기준치에 영향을 미칠 수 있다. 이런 요소들 가운데 주변광

의 세기는 가장 효과적인 변수로서(Morato and Castrechini, 1989; Rodgers and Dalvi, 1997; Wall and Messier, 2001) 주변의 밝기를 증가시키면 십자형 미로 테스트에서 증가된 불안 반응을 유도한다. 전자파의 노출이 흰쥐 대뇌 껍질에서 벤조디아제핀 수용체의 수가 증가한 것을 보였던 것(Lai et al., 1992)과 동일한 실험조건에서 전자파의 노출은 주변광의 세기에 따른 증가된 불안반응 유도와는 달리 십자형 높은 미로 장치에서 측정된 불안반응을 변화시키지 않았다(Cosquer, 2005a).

흰쥐의 혈액-뇌 장벽의 투과도 변화는 2.45 GHz 전자파 노출 시에 신호에 의해 유도된 고열 때문에 장벽의 투과도가 변경될 수 있다고 보고하였다(Sutton, 1973). 그 후에 연속뿐만 아니라, 펄스파(1.3 GHz, 3.0 mW/cm<sup>2</sup>)도 혈액-뇌 장벽의 투과성을 증가시킬 수 있다는 연구결과들이 보고되었다(Oscar and Hawkins, 1997). D'Andrea 등(2003)이 혈액-뇌 장벽의 투과성에 영향을 미치는 것들에 대한 연구들을 요약하였는데, 여기서 다른 전자파 노출에 따른 혈액-뇌 장벽 투과성 변화에 대한 논문들 중 상당부분의 연구들이 전자파가 혈액-뇌 장벽 특성을 변경할 수 있다는 것을 지지한다고 제시하였다. 하지만 저자들은 혈액-뇌 장벽 투과 변경이 SAR에 따라 달라질 수 있음을 강조하였다(D'Andrea, 2003). 즉, 신호 강도가 충분히 높은 경우(높은 SAR)에는 전자파의 폭로가 뇌신경계의 온도 상승을 유발할 수 있어 혈액-뇌 장벽의 특성을 변화시킬 수 있지만, 낮은 SAR에서는 혈액-뇌 장벽에 대한 열적 효과는 제한적이거나 거의 없어, 혈액-뇌 장벽 투과성은 변화하지 않는다고 보고하였다(D'Andrea, 2003). 그러나 Fritze 등(1997)과 Salford 등(1994)은 전자파 노출에 따른 열적 효과의 부재에서도 혈액-뇌 장벽 투과성이 증가한다는 결과를 제시하였다. 이런 상반된 연구결과들로 인해서 전자파 노출에 따른 혈액-뇌 장벽 투과성 변화의 문제도 여전히 논쟁거리이다(D'Andrea et al., 2003).

전자파 노출에 따른 혈액-뇌 장벽 투과성 변화에 대한 영향을 평가하기 위해서 연구자들은 45분 동안 2.45 GHz의 마이크로파(SAR 2 W/kg)에 노출된 쥐에게 쉽게 혈액-뇌 장벽을 통과하지 않는 무스카린 길항제인 scopolamine methylbromide(MBR)를 투약한 후, 인지 효과의 변화를 평가하였다(Cosquer et al., 2005a). 전자파 노출과 약물을 투여한 후에, 12-

방향 방사상 미로에서 그 흰쥐를 시험했다. 자세하게 설명하면, 기억에 손상을 유발하는 것(Cassel and Kelche, 1989; Ebert and Kirch, 1998)으로 알려진 scopolamine을 전자파에 노출 전 또는 후에 각각 주입하였다. 그런 다음 혈액-뇌 장벽을 통과하지 못하는 4급 암모늄 유도체인 scopolamine methylbromide(MBR)를 전신 주입하여 2  $\mu$ s 펄스 간격과 초당 500 펄스의 2.45 GHz(전신노출 평균 SAR 2.0 W/kg  $\pm$  2 dB, 뇌 평균 SAR 3.0 W/kg  $\pm$  3 dB)의 EMF에 45분 노출 후 미로 수행능력을 조사하였다. 최종적으로 흰쥐 정맥에 혈청알부민과 결합하는 Evans blue를 노출 전후에 주사하여, scopolamine MBR이 혈액-뇌 장벽을 통과하는지도 조사하였다. 이 실험의 가설은 만약에 전자파가 혈액-뇌 장벽 투과성을 변경하면, scopolamine methylbromide(MBR)이 전자파에 노출되지 않은 동물에 비해 더 많은 양이 뇌로 들어가 더 많은 무스카린 수용체들이 차단된 결과, 방사상 미로의 수행 변화를 초래할 것이라는 가정에 근거한 것이다. 하지만 대조군과 비교했을 때 전자파 노출 전후에 약물을 투여한 군들에서 미로 수행 능력의 차이가 관찰되지 않아, 이 실험 조건에서는 혈액-뇌 장벽이 투과도가 변화하지 않은 것으로 결론을 내렸으며, 또한 EMF에 노출된 흰쥐 혈관에서 Evans blue가 유출되어 뇌실질의 염색이 관찰되지 않은 것도 이런 결론을 뒷받침해 주었다(Cosquer et al., 2005a). 전자파에 의한 혈액-뇌 장벽의 투과성 변화에 대한 다른 의견으로는, 혈압의 변화가 혈액-뇌 장벽의 투과성을 변경할 수 있다는 보고들(Al-Sarraf and Philip, 2003; Hossmann and Hermann, 2003)에서 제시된 바와 같이, 혈액-뇌 장벽의 투과성은 혈압의 변화로 변경될 수 있다는 것이다. 따라서 전자파의 노출과 혈압의 변화에 대한 종합적인 연구들이 요구된다.

## VI. 전자파 노출과 학습 및 기억기능

상당한 양의 연구들이 다양한 방법을 이용하여 EMF에 노출시킨 후, 설치류의 행동 장애 특히 학습 및 기억 결핍에 관한 연구들에 집중되어 왔다. 이 문제에 대한 가장 초기의 두 연구들은 방사상 미로와 Morris Water 미로 시험을 통해, EMF(2,450 MHz)에 노출된 흰쥐에서 학습 및 기억 기능이 감소하는 것을 보였지만(Lai et al, 1994; Wang and Lai, 2000), 변화

의 가능성을 검증하기 위해 나중에 시행된 2,450 MHz, 0.6 W/kg SAR에서 10일 동안 45분간 마이크로파에 전신 노출된 흰쥐 방사상 미로검사에서는 ‘작업기억(working memory)’을 변화시키는 어떤 효과도 관찰할 수 없었다(Cobb et al., 2004; Lai, 2005). 뿐만 아니라, 900 MHz GSM (1 그리고 3.5 W/kg SAR)에 머리만 노출된 쥐를 사용해 물체인식시험(ORT)에 의한 인식기억을 시험하였다(Dubreuil et al., 2003). 이 연구실험에서 낮은 SAR 수준에서는 학습 및 기억에 대한 아무런 영향을 발견하지 못했을 뿐만 아니라, 높은 SAR 레벨 (3.5 W/kg)에서도 탐사 활동에만 일부 효과가 나타났다.

비록 전자파의 경우에는 인간(Hossmann and Hermann 2003; Preece et al., 1999)과 동물(Yamaguchi et al., 2003) 모두에서 인지기능에 영향을 미치며 이러한 인지기능에 대한 기능 변화는 공간학습과 기억상실(Ammari et al., 2008)에 영향을 줄 수 있는 것으로 보고되었지만, 이런 전자파의 영향에 대한 직접적인 증거는 아직 불분명한 것으로 남아 있다. 해마는 설치류에서 공간 학습 및 기억 과정에 관여하는 곳으로(Morris et al., 1982; Moser et al., 1998), Sienkiewicz 등(Sienkiewicz et al., 2000)은 700 MHz에서 낮은 강도의 전자파가 흰쥐 뇌의 해마 절편에서 전기 활동을 변화시킬 수 있음을 보고했다. 마찬가지로 1,800 MHz의 이동 전화(GSM) 주파수 노출(8일 동안 하루에 15분, SAR 2.40 W/kg)은 배양된 해마 신경세포의 흥분성 시냅스 활성을 감소시키는 것으로 보고되었다(Xu et al., 2006). 일련의 연구자들에 따르면 전자파에 대한 노출은 공간 기억 시험에서 설치류의 과제수행 결함을 유도한다(Dubreuil et al., 2003)고 주장하였으나, 다른 연구자들은 2,450 MHz의 EMF에 전신 노출에도 12방향 방사성 미로 시험에서 기억력 감소를 유도하지 않았다고 보고하였다(Cassel et al., 2004; Cobb et al., 2004). 유사하게, 머리만 900 MHz의 GSM 신호에 노출시킨 쥐를 이용한 시험(Dubreuil et al., 2002; Dubreuil et al., 2003)에서 공간 기억력 손상에 대한 어떤 영향도 찾을 수 없었다. 게다가, 900 MHz의 마이크로파 방사선에 10일간 전신 노출되더라도 생쥐의 공간학습 수행능력의 손상은 발생하지 않았다(Sienkiewicz et al., 2000). 비록 water-maze 실험결과에서는 실험값이 증가한 것으로 나타났지만, 900 MHz 주파수 신호에 5주간(1일 2시간, 주 5일, SAR 3 W/kg) 노출된 젊은 쥐에서 시행한 일련의 공간기

역력에 대한 실험들(open field, the plus-maze, the acoustic startle)에서 전자파 노출에 따른 실험값의 변화에 대한 영향이 전혀 없는 것으로 주장되었다(Kumlin et al., 2007).

최근에 전자파의 인지기능에 대한 영향에 관해서 매우 흥미로운 연구결과가 발표되었는데, 전자파의 노출이 기억 소실을 유발하는 것으로 알려진 인간의 알츠하이머병에서와 같은 인지장애를 갖는 트리플 형질전환 마우스(3xTg-AD)의 인지 행동을 개선한다고 보고하였다(Banaceur et al., 2013). 이 실험은 WiFi형 2.40 GHz 전자파(RF) 신호로 하루에 두 시간씩 1.60 W/kg의 전자파 흡수율(SAR)로 1개월 동안 장기 노출시켰을 때, 대조군 생쥐와 발달하면서 알츠하이머와 같은 인지장애를 갖는 트리플 형질전환 마우스(3xTg-AD)에서 RF전자파 노출의 효과를 연구하고자 설계되었다. 간략하게 소개하면, 실험에 사용된 생쥐는 두 개의 대조군(야생형, 형질전환군; N = 7)과 노출실험 2개 군(야생형, 형질전환군; N = 7) 네 개의 그룹으로 나누었다. 연구에 사용된 인지간섭 시험은 Flex field 활동 시스템 시험, 두 구획 박스 시험 및 Barnes 미로 시험 등으로 사람의 인지간섭 시험과 유사하게 설계되었다. 이러한 실험조건에서 실시된 결과에 따르면 적어도 RF 전자파의 노출이 알츠하이머병에서 나타나는 인지기능 소실을 실험동물이긴 하지만, 인지장애를 회복시키는 효과적인 기억력 향상을 가져올 수 있다고 제시하였다(Banaceur et al., 2013). 비록 수많은 연구에도 불구하고, 고주파 EMF 노출이 기억력을 포함한 인지기능에 위협한지는 지금까지도 명확한 결론이 없다. 반대로, 휴대전화의 직접적 사용으로 8개월 이상 장기간 노출(GSM 918 MHz, SAR 0.25 W/kg)된 형질전환 알츠하이머 생쥐에서는 도리어 인지능력이 향상되는 것으로 보고되었다(Arendash et al., 2010). 무선 신호에 노출되면 반응 시간이 감소하고 덜 불안했으며, 운동활성이나 체중이나 체온에 아무런 영향이 발견되지 않았으며, 결론적으로 전자파 노출이 알츠하이머병의 기억력 향상에 효과적인 접근방법이라 할 수 있다는 매우 흥미로운 결론을 내렸다. 이러한 일련의 실험결과들은 전자파 노출이 뇌신경계의 적응반응과 같은 자극 현상을 유도할 수 있음을 제시한다(Arendash et al., 2010; Banaceur et al., 2013).

## VII. 전자파 노출과 관련된 여러 가지 생체영향들

미국 국립보건연구소(NIH)의 연구에 의하면 휴대 전화로부터 방출되는 무선 주파수(RF-EMF)가 인간 뇌의 대사작용을 활성화한다고 보고하였다(Volkow et al., 2011). 47명의 건강한 사람의 양쪽 귀에 휴대폰을 배치하여 한쪽 귀에 50분간 휴대전화(837.5 MHz)에 노출한 후, 뇌 대사(metabolism) 변화를  $^{18}\text{F}$  fluorodeoxyglucose( $^{18}\text{FDG}$ )를 주입 후 PET 스캔을 통해 영상화하였다. 영상화된 뇌의 이미지를 통하여 휴대폰의 안테나 즉 RF-EMF에 노출된 뇌의 부분에서 포도당 대사(glucose metabolism)가 급격히 증가됨이 관찰되었다. 이는 인간의 두뇌는 RF-EMF의 효과 즉 전자파에 민감하다는 증거를 제공했다. 그러나 이에 대한 의학적 메커니즘과 이와 연관된 증상에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 또한 전자파(RF) 노출은 생쥐의 출산 시 생존율을 감소시켰으며(Magras et al., 1997), 전자파(RF-EMF)의 노출에 의해 정자 수와 정자의 질(quality)이 모두 감소한다는 연구결과가 보고되었다(Kilgallon et al., 2005; Wdowiak et al., 2007; Agarwal et al., 2009). 또한 휴대전화 사용량이 많은 남성일수록 정자 수가 작았고, 아울러 정자의 운동성도 떨어졌다(Erogul et al., 2006; Falzone et al., 2011; Gutsch et al., 2011). 세포실험에서 전자파(RF-EMFs)에 노출된 정자의 DNA를 손상됨을 확인하였다(De Iulius, 2009).

휴대 전화에 의해 방출된 전자파(RF-EMFs)는 신경 세포의 활동에 영향을 미칠 수 있을 정도로 뇌에 흡수된다(Dubey, 2010; Kleinlogel, 2008). 또한 전자파(RF-EMFs)로 발생하는 열 효과(thermal effects)는 휴대 전화에 의해 생성된 온도에 의해 신경세포 활성화에 영향을 미칠 수 있는 가능성을 제시한다(Wainwright, 2000). 마이크로파(microwave radiation)의 잘 알려진 열 효과(thermal effects)는 전자파(EMF)에 의해 유도되는 극성 분자(polar molecules)의 회전에 의해 생성된 열을 통해서 생체 조직과 유전물질이 가열되는 것이다. 휴대 전화를 사용하는 경우, 대부분은 사람의 머리의 표면에 가열 효과가 발생한다. 이 경우, 어느 정도의 온도 상승은 뇌의 혈액 순환에 의해 부분적으로 과도하게 올라간 열을 낮출 수 있으나, 인간의 눈 즉 각막(cornea)과 같은 조직들은 혈액 순환을 통한 온도 조절시스템이 없기 때문에 위험을 초래할 수 있다. 예를 들면, 토끼의 눈에 2,450 MHz(100~140 W/kg, SAR)로 30분간 노출되었을 때 수정체가 41°C까지 올라가

백내장(cataract)을 유발되는 것이 보고되었다(Elder JA, 2003). 그러나 동일한 조건의 원숭이를 이용한 실험에서는 백내장이 유발되지는 않았다. 물론 이 실험에 사용된 전자파(RF)의 SAR 값이 허용치를 넘어서 과도하게 높게 설정되었지만, 장기간 규칙적으로 휴대전화를 사용하는 인간에게도 백내장과 같은 눈의 질병을 야기할 가능성을 배제할 수는 없다.

### VIII. 전자파 노출과 질병치료에 대한 응용 가능성

지금까지 토론한 바와 같이, 일반적으로 전자파의 노출은 생체기능에 부정적인 영향을 우려하는 측면이 강하긴 하지만, 전자파를 이용하여 여러 가지 질병치료를 실행하는 긍정적인 측면으로 응용하는 여러 의료가들이 오랫동안의 연구로 실용화되어 현재 다방면에서 이용되고 있다. 최근에는 실험동물이 고주파 전자파에 사전 노출되면 후속 세균감염에 저항력이 높아지는 연구결과들이 발표되기도 하였다(Sannino et al., 2009; Vijayalaxmi et al., 2014; Sannino et al., 2013). 전자파에 인체가 노출되면 단기 메모리의 성능이 향상되며, 반응 시간도 감소한다는 보고도 있으며(Mortazavi et al., 2014), 다른 연구자들은 또한 알츠하이머병의 인지장애를 막아주는 것과 같은 전자파-유도 혜택을 확인하는 증거도 제공하였다(Arendash et al., 2010; Banaceur et al., 2013). 전자파의 뇌신경계 영향에 대한 다양한 시각들이 존재하며, 부정적인 영향에 대비하여 전자파의 잠재적 혜택의 가능성이 제시되고 있으며, 대표적으로는 위에 언급한 적응성 유도현상이지만 이것에만 한정되는 것은 아니다.

일반적으로 잘 알려진 전자파 이용한 치료 기술로는 전자파 온열 치료(Hyperthermia)가 있다. 이는 전자파에 의한 열효과를 이용한 것으로 혈액순환과 근육을 유연하게 하여 근육통 해소와 피로회복 등에 효과가 있다. 또한 전자파를 이용하여 악성 종양 치료에도 이용하고 있다. 전자파가 종양 조직에 열을 집중하여 치료하는 방식이다(Gonzalez, 2007). 또한 다양한 종류의 자기파(MF) 및 전자파(EMF)는 현대 의학에 성공적으로 응용하여 지금과 같은 자기 공명 영상(MRI), 스캐너 및 전자 영상을 이용한 진단과 치료 목적으로 의학에 효과적으로 사용 중에 있다(Consales et al., 2012). 전자파 치료 요법은 기존의 의학에서 간과하거나 치유하지 못한 여

러 건강 문제를 치료할 수 있는 한 방법이 되었다. 오늘날 자기파(MF) 치료는 상처 부위, 통증과 염증의 원인, 질병 및 병리 등에 다양하게 치료를 할 수 있는 비침투적이고 안전하고 쉬운 치료 방법이다(Markov, 2007). 세계 각지의 수많은 사람들이 이를 통해 근골격계의 치료뿐만 아니라, 통증 완화를 위해 전자파의 도움을 받고 있다. 일정 패턴의 펄스 전자파(pulsed electromagnetic fields)는 자성을 이용한 중요한 치료로서 자리매김하였다(Markov, 2007). 낮은 주파수와 강도 범위(Gauss or micro-Tesla) 내의 펄스 전자파는 섬유근육통(fibromyalgia)에서 통증과 피로를 개선시키고, 세포 대사작용과 혈액 순환을 향상시킨다. 또한 혈액에 산소를 증가(Sutbeyaz et al., 2009)시키고, 치료-저항성 우울증(treatment-resistant depression) 환자에 큰 도움이 되기도 한다(Martiny et al., 2010). 또한 다발성 경화증(multiple sclerosis)의 증상을 완화시킬 수 있으며(Lappin et al., 2003), 조직 재생 및 복구를 자극하는 몇 가지 병리적 상태의 치료에도 일반적으로 사용된다. 마취하지 않은 흰쥐에 상처를 낸 후 그 부위에 1,600 G의 자기파를 노출시켰고, 그 결과 자기파에 노출한 쥐의 상처부위에서 빠른 조직 재생이 관찰되었으며(Bertolino et al., 2006), 또한 역분화 줄기세포를 제작하는데 전자파를 이용하기도 했다. 기존 역분화 기술에 사용되던 Klf4, cMyc, Sox2 등 암 유발인자를 사용하지 않고, Oct4라는 한 가지 인자만 사용하여 극저주파 EL-EMF(50 Hz, 1 mT)를 30~45일 처리할 경우, 역분화 줄기세포가 제작된다는 결과가 발표되었다(Baek et al., 2014). 특히 전자기 파동 에너지를 이용할 경우, 역분화 줄기세포 제작효율이 기존의 역분화 기술에 비해 약 37배 높아 효율성 측면에서 우월성이 확인됐다(Baek et al., 2014). 정형외과 분야에서 비-연합 골절과 실패한 융합체의 치료를 위한 적용은 펄스 전자파(PEMF)가 손상된 세포에 정상 전위의 재 확립을 촉진한다는 증거를 이용하여(Fiorani et al., 1997), 골아 세포의 증식 및 분화(Wei et al., 2008)를 촉진하고, 치유 과정의 골 형성을 향상시킬 수도 있다(Canè et al., 1993). 또한 전자파는 세포 생존을 향상시키고, 허혈성 손상을 감소시킨다(Grant et al., 1994).

## IX. 전자파 노출과 생체영향에 관한 전망

인류의 기술적 진보로 많은 전기 전자제품 및 통신 기술

을 발달시켜 왔다. 특히 현대인에게 필수품이 되어 버린 컴퓨터, 스마트폰과 같은 IT 무선 통신 기술 발달로 인간은 더 많은 인공적인 전자파(EMFs)에 노출되는 환경의 결과를 초래하였다. 전자파(RF-EMF)에 노출된 세포와 동물의 유전적 독성 효과(genotoxic effects)가 계속적으로 보고되고 있으나, 이와 상반된 결과도 많이 보고되고 있어 논란의 여지가 많다. 또, 다른 논란을 가지는 전자파와 백혈병 등 여러 암과의 관련성에 관해서는 아직까지 확실하고 직접적인 증거를 보이지 못하고 있지만, 유전적 독성 효과로 인한 세포의 DNA 손상과 염색체 불안정성(chromosomal instability) 등은 유전적 장애를 일으켜 결국 암을 유도할 수 있을 것이다. 또한 휴대전화가 활성화가 20여년에 불과하므로 그 연관성을 보기까지 전자파에 수십 년의 노출이 걸리기 때문에 자료의 축적과 분석은 이러한 논란에 대한 결과를 제시할 수 있을 것이다. 또한 RF-EMF에 노출된 뇌의 부분에서 포도당 대사(glucose metabolism)가 급격히 증가됨이 관찰되었다(Volkow et al., 2011). 전자파(RF)의 SAR 값이 과도하게 노출된 토끼의 눈에서 백내장이 유도되었으나, 동일한 실험 조건에서 원숭이 실험에서는 유도하지 못했다. 전자파의 유해성에 많은 논란이 되고 있는 반면, 전자파를 응용하여 순기능적 의학 생물학적 치료를 실행하고 있다. 자기 공명 영상(MRI), 스캐너 및 전자 영상을 이용한 진단 목적으로도 전자파를 이용하고 있다. 펄스 전자파(pulsed electromagnetic fields)는 자성을 이용한 중요한 치료로서 여러 치료에 사용되고 있으며, 극전자파를 이용해 안전한 역분화 줄기세포를 제작했다. 이러한 전자파를 이용한 의학 생물학적 응용 기술이 개발 확대되고 있다. 이렇듯 전자파는 유해성 있어 많은 논란이 되고 있는 반면, 전자파를 이용하여 질병의 치료를 돕는 의학적 응용 기술 개발이 확대되고 있다. 전 세계적으로 이 전자파 응용 기술이 고부가가치를 창출할 의료융합 기술로 확대되고 있는 현실이다. 이런 관점에서, 또 다른 전자파 유도 자극이나 생체기능에 대한 유익한 효과가 있는지의 여부는 반드시 도전해 볼 만한 과제로 간주된다. 또한 이런 전자파 유도 자극 효과의 응용 가능성을 조사하기 위한 연구 역시 꼭 진행해 볼 만한 연구라 할 수 있다. 이와 더불어 상이한 레벨의 무선 주파수 방사에 따른 인체의 단기 및 장기 노출에 의한 건강 효과를 명확히 하기 위한 추가 연구들도 반드시 뒤따

라야 할 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2014 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014R1A2A-2A04003616).

### 참 고 문 헌

- [1] Abdel-Rassoul G, Abou El-Fateh O, Abou Salem M, et al., "Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations", *Neurotox.*, 28(2), 434-440, 2007.
- [2] Agarwal A, Desai NR, Makker K, Varghese A, Mouradi R, Sabanegh E et al., "Effects of radiofrequency electromagnetic waves (RF-EMW) from cellular phones on human ejaculated semen: An *in vitro* pilot study", *Fertil Steril.*, 92(4), 1318-1325, 2009.
- [3] Al-Sarraf H, Philip L, "Effect of hypertension on the integrity of blood brain and blood CSF barriers, cerebral blood flow and CSF secretion in the rat", *Brain Res.*, 975(1/2), pp. 179-88, 2003.
- [4] Ammari M, Jeljeli M, Maaroufi K, Roy V, Sakly M and Abdelmelek H, "Static magneticfield exposure affects behavior and learning in rats", *Electromagnetic Biologyand Medicine.*, 27(2), pp. 185-96, 2008.
- [5] Arendash GW1, Sanchez-Ramos J, Mori T, Mamcarz M, Lin X, Runfeldt M, Wang L, Zhang G, Sava V, Tan J and Cao C, "Electromagnetic field treatment protects against and reverses cognitive impairment in Alzheimer's disease mice", *J. Alzheimer's Dis.*, 19, pp. 191-210, 2010.
- [6] Awad SM, Hassan NS, "Health risks of electromagnetic radiation from mobile phone on brain of rats", *J. Appl. Sci. Res.*, 4(12), pp. 1994-2000, 2008.
- [7] Baan R, Grosse Y, Lauby-Secretan B et al., "Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields", *The Lancet Oncology*, 12(7), pp. 624-626, 2011.
- [8] Baek S, Quan X, Kim S, Lengner C, Park JK and Kim J, "Electromagnetic fields mediate efficient cell reprogramming into a pluripotent state", *ACS Nano.*, 28; 8(10), pp. 10125-10138, 2014.
- [9] Banaceur S, Banasr S, Sakly M and Abdelmelek H, "Whole body exposure to 2.4 GHz WIFI signals: Effects on cognitive impairment in adult triple transgenic mouse models of Alzheimer's disease (3xTg-AD)", *Behav. Brain Res.*, 240, pp. 197-201, 2013.
- [10] Barr R, Jones D and Llanwyn RCJ, "ELF and VLF radio waves", *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.*, 62(17-18), pp. 1689-1718, 2000.
- [11] Benson VS, Pirie K, Schütz J, Reeves GK, Beral V and Green J, "Million women study collaborators. Mobile phone use and risk of brain neoplasms and other cancers: Prospective study", *Int. J. Epidemiol.*, 42(3), pp. 792-802, 2013.
- [12] Bertolino G, de Freitas BA, de Oliveira L do CRK, de Brito JLC and de Araujo JE, "Macroscopic and histological effects of magnetic field exposition in the process of tissue reparation in Wistar rats", *Arch. Dermatol. Res.*, 298 (3), pp. 121- 126, 2006.
- [13] Braune S, Wrocklage C, Raczek J, Gailus T and Lücking CH, "Resting blood pressure increase during exposure to a radiofrequency electromagnetic field", *Lancet.*, 20;351(9119), pp. 1857-1858, Jun. 1998.
- [14] Byun YH, Ha M, Kwon HJ, Hong YC, Leem JH, Sakong J, Kim SY, Lee CG, Kang D, Choi HD and Kim N, "Mobile phone use, blood lead levels, and attention deficit hyperactivity symptoms in children: A longitudinal study", *PLoS One.*, 8(3):e59742, 2013.
- [15] Canè V, Botti P and Soana S, "Pulsed magnetic fields improve osteoblast activity during the repair of an experimental osseous defect", *J. Orthop. Res.*, 11(5), pp. 664-670, 1993.
- [16] Cassel JC, Cosquer B, Galani R and Kuster N, "Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter radial-maze performance in rats", *Behavior and Brain Research*, 155, pp. 37-43, 2004.



- [17] Cassel JC, Kelche C, "Scopolamine treatment and fimbria-fornix lesions: Mimetic effects on radial maze performance", *Physiol. Behav.*, 46(3), pp. 347-353, 1989.
- [18] Cobb BL, Jauchem JR and Adair ER, "Radial arm maze performance of rats following repeated low level microwave radiation exposure. *Bioelectromagnetics*, 25(1), pp. 49-57, 2004.
- [19] Consales C, Merla C, Marino C and Benassi B, "Electromagnetic fields, oxidative stress and neurodegeneration", *Int. J. Cell Biol.*, 2012, p. 683897, 2012.
- [20] Cosquer B, Galani R, Kuster N and Cassel JC, "Whole-body exposure to 2.45 GHz electromagnetic fields does not alter anxiety responses in rats: A plus-maze study including test validation", *Behav. Brain Res.*, 156(1), pp. 65-74, 2005.
- [21] Cosquer B, Vasconcelos AP, Fröhlich J and Cassel JC, "Blood-brain barrier and electromagnetic fields: Effects of scopolamine methylbromide on working memory after whole-body exposure to 2.45 GHz microwaves in rats", *Behav. Brain Res.*, 20;161(2), pp. 229-237, Jun. 2005a.
- [22] D'Andrea JA, Chou CK, Johnston SA and Adair ER, "Microwave effects on the nervous system", *Bioelectromagnetics*, (Suppl. 6), pp. S107-147, 2003.
- [23] Demisia G, Vlastos D and Matthopoulos DP, "Effect of 910-MHz electromagnetic field on rat bone marrow", *The Scientific World Journal*, 4(S2), pp. 48-54, 2004.
- [24] De Iuliis GN, Newey RJ, King BV and Aitken RJ, "Mobile phone radiation induces reactive oxygen species production and DNA damage in human spermatozoa *in vitro*", *PLOS ONE*, 4(7), e6446, 2009.
- [25] Dubey RB, Hanmandlu M and Gupta SK, "Risk of brain tumors from wireless phone use", *J. Comput. Assist. Tomogr.*, 34(6), pp. 799-807, 2010.
- [26] Dubreuil D, Jay T and Edeline JM, "Does head-only exposure to GSM-900 electromagnetic fields affect the performance of rats in spatial learning tasks?" *Behavior and Brain Research*, 129, pp. 203-210, 2002.
- [27] Dubreuil D, Jay T and Edeline JM, "Head-only exposure to GSM 900-MHz electromagnetic fields does not alter rat's memory in spatial and non-spatial tasks", *Behavior and Brain Research*, 145, pp. 51-61, 2003.
- [28] Ebert U, Kirch W, "Scopolamine model of dementia: Electroencephalogram findings and cognitive performance", *Eur. J. Clin. Invest.*, 28(11), pp. 944-949, 1998.
- [29] Elder JA, "Ocular effects of radiofrequency energy", *Bioelectromagnetics*, 6, pp. S148-161, 2003.
- [30] Elliott P, Toledano MB, Bennett J, Beale L, de Hoogh K, Best N and Briggs DJ, "Mobile phone base stations and early childhood cancers: Case-control study", *BMJ*, 340, c3077, 2001.
- [31] Erogul O, Oztas E, Yildirim I, Kir T, Aydur E, Komesli G et al., "Effects of electromagnetic radiation from a cellular phone on human sperm motility: An *in vitro* study", *Arch. Med. Res.*, 37(7): pp. 840-843, 2006.
- [32] Falzone N, Huyser C, Becker P, Leszczynski D and Franken DR, "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 (1), pp. 20-26, 2011.
- [33] Fiorani M, Biagiarelli B, Vetrano F, Guidi G, Dachà M and Stocchi V, "*In vitro* effects of 50 Hz magnetic fields on oxidatively damaged rabbit red blood cells bioelectromagnetics", *Bioelectromagnetics*, 18(2), pp. 125-131. 1997.
- [34] Franke et al., "Electromagnetic fields (GSM 1800) do not alter blood-brain barrier permeability to sucrose in models *in vitro* with high barrier tightness", *Bioelectromagnetics*, 26(7): pp. 529-535, 2005.
- [35] Frey AH, "Headaches from cellular telephones: Are they real and what are the implications?", *Environ. Health Perspect.*, 106(3), pp. 101-103, Mar. 1998.
- [36] Fritze K, Sommer C, Schmitz B, Mies G, Hossmann KA, Kiessling M et al., "Effect of global system for mobile communication (GSM) microwave exposure on blood-brain barrier permeability in rat", *Acta Neuropathol. (Berl)*, 94(5) pp. 465-470, Nov. 1997.

- [37] Gonzalez FJ, "Thermal simulation of breast tumors", *AGO-STO*, 53(4), pp. 323-326, 2007.
- [38] Grant G, Cadossi R and Steinberg G, "Protection against focal cerebral ischemia following exposure to a pulsed electromagnetic field", *Bioelectromagnetics*, 15(3), pp. 205-216, 1994.
- [39] Gutsch T, Mohamad Al-Ali B, Shamloul R, Pummer K and Trummer H, "Impact of cell phone use on men's semen parameters", *Andrologia*, 43(5), pp. 312-316, 2011.
- [40] Hardell L, Carlberg M and Hansson Mild K, "Use of cellular telephones and brain tumour risk in urban and rural areas. Occup", *Environ. Med.*, 62, pp. 390-394, 2005.
- [41] Hardell L, Carlberg M, Söderqvist F, Mild KH and Morgan LL, "Long-term use of cellular phones and brain tumours: increased risk associated with use for > or = 10 years", *Occup. Environ. Med.*, 64(9), pp. 626-632, 2007.
- [42] Handley SL, Mithani S, "Effects of alpha-adrenoceptor agonists and antagonists in a maze-exploration model of 'fear'-motivated behaviour", *Naunyn Schmiedebergs Arch. Pharmacol.*, 327(1), pp. 1-5, 1984.
- [43] Hoeijmakers JH, "DNA damage, aging, and cancer", *N. Engl. J. Med.*, 361(15), pp. 1475-1485, 2009.
- [44] Hodges H, "Maze procedures: The radial-arm and water maze compared", *Brain Res. Cognit. Brain Res.*, 3(3/4), pp. 167-181, 1996.
- [45] Hollenbach DF, Herndon JM, "Deep-earth reactor, nuclear fission, helium, and the geomagnetic field", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 98, pp. 11085-11090, U.S.A., 2001.
- [46] Hossmann KA, Hermann DM, "Effects of electromagnetic radiation of mobile phones on the central nervous system", *Bioelectromagnetics*, 24(1), pp. 49-62, 2003.
- [47] Hutter HP, Moshammer H, Wallner P and Kundi M, "Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations", *Occup. Environ. Med.*, 63, pp. 307-313, 2006.
- [48] Johanson B, Olsson Y and Klatzo I, "The effect of acute arterial hypertension on the BBB to protein tracers", *Acta Neuropathol.*, 16, pp. 117-124, 1970.
- [49] Kilgallon SJ, Simmons LW, "Image content influences men's semen quality", *Biol. Lett.*, 1(3), pp. 253-255, 2005.
- [50] Kleinlogel H, Dierks T, Koenig T, Lehmann H, Minder A and Berz R, "Effects of weak mobile phone-electromagnetic fields (GSM, UMTS) on event related potentials and cognitive functions", *Bioelectromagnetics*, 29(6), pp. 488-497, 2008.
- [51] Kolodynski AA, Kolodynska VV, "Motor and psychological functions of school children living in the area of the Skrunda Radio Location Station in Latvia", *Sci. Total Environ.*, 180, pp. 87-93, 1996.
- [52] Kumlin T, Iivonen H, Miettinen P, Juvonen A, van Groen T, Puranen L, et al., "Mobile phone radiation and the developing brain: Behavioral and morphological effects in juvenile rats", *Radiation Research*, 168, 471-479, 2007.
- [53] Kuribayashi et al., "Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the blood-brain barrier in immature and young rats", *Bioelectromagnetics*, 26(7), pp. 578-588, 2008.
- [54] Lai H, Carino MA, Horita A and Guy AW, "Single vs. repeated microwave exposure: Effects on benzodiazepine receptors in the brain of the rat", *Bioelectromagnetics*, 13(1), pp. 57-66, 1992.
- [55] Lai H, "Radial arm maze performance of rats following repeated low level microwave radiation exposure", *Bioelectromagnetics*, 26(2), p. 81, 2005.
- [56] Lappin MS, Lawrie FW, Richards TL and Kramer ED, "Effects of a pulsed electromagnetic therapy on multiple sclerosis fatigue and quality of life: A double-blind, placebo controlled trial", *Altern. Ther. Health Med.*, 9(4), pp. 38-48, 2003.
- [57] Lai H, Horita A and Guy AW, "Microwave irradiation affects radial-arm maze performance in the rat", *Bioelectromagnetics*, 15(2), pp. 95-104, 1994.
- [58] Lai H, Singh NP, "Magnetic-field-induced DNA strand breaks in brain cells of the rat", *Environmental Health*

- Perspectives*, 112(6), pp. 687-694, 2004.
- [59] Lee S, Johnson D and Dunbar K, "2.45 GHz radiofrequency fields alter gene expression on cultured human cells", *FEBS Letters*, 579, pp. 4829-4836, 2005.
- [60] Leszczynski D, Joenvaara S, "Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: Molecular mechanism for cancer - and blood-brain barrier - related effects", *Differentiation*, 70, pp. 120-129, 2002.
- [61] Magras IN, Xenos TD, "RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice", *Bioelectromagnetics*, 18, pp. 455-461, 1997.
- [62] Mann K, Wagner P, Brunn G, Hassan F, Hiemke C and Röschke J, "Effects of pulsed high-frequency electromagnetic fields on the neuroendocrine system", *Neuroendocrinology*, 67(2), pp. 139-144, Feb. 1998.
- [63] Markov MS, "Expanding use of pulsed electromagnetic field therapies", *Electromagn. Biol. Med.*, 26(3), pp. 257-274, 2007.
- [64] Martiny K, Lunde M and Bech P, "Transcranial low voltage pulsed electromagnetic fields in patients with treatment-resistant depression", *Biol. Psychiatry*, 68(2), pp. 163-169, 2010.
- [65] Mashevich M, Foldman D, Kesar et al., "Exposure of human peripheral blood lymphocytes to electromagnetic fields associated with cellular phones leads to chromosomal instability", *Bioelectromagnetics*, 24, pp. 82-90, 2003.
- [66] Micheau J, Van Marrewijk B, "Stimulation of 5-HT1A receptors by systemic or medial septum injection induces anxiogenic-like effects and facilitates acquisition of a spatial discrimination task in mice", *Prog. Neuropsychopharmacol Biol. Psychiatry*, 23(6), pp. 1113-1133, 1997.
- [67] Millan MJ, "The neurobiology and control of anxious states", *Prog. Neurobiol.*, 70(2), pp. 83-244, 2003.
- [68] Morato S, Castrechini P, "Effects of floor surface and environmental illumination on exploratory activity in the elevated plus-maze", *Braz. J. Med. Biol. Res.*, 22(6), pp. 707-710, 1989.
- [69] Morgan LL, Miller AB, Sasco A and Davis DL, "Mobile phone radiation causes brain tumors and should be classified as a probable human carcinogen (2A) (Review)", *Int. J. Oncol.*, 25, Feb. 2005.
- [70] Morris RG, Garrud P, Rawlins JN and O'Keefe J, "Place navigation impaired in rats with hippocampal lesions", *Nature*, 297, pp. 681-683, 1982.
- [71] Mortazavi SA, Tavakkoli-Golpayegani A, Haghani M and Mortazavi SM, "Looking at the other side of the coin: The search for possible biopositive cognitive effects of the exposure to 900 MHz GSM mobile phone radiofrequency radiation", *J. Environ. Health Sci. Eng.*, 26, 12:75, Apr. 2014.
- [72] Moser EI, Krobot KA, Moser MB and Morris RG, "Impaired spatial learning after saturation of long-term potentiation", *Science*, 281, pp. 2038-2042, 1998.
- [73] Moulder JE, Foster KR, Erdreich LS and McNamee JP, "Mobile phones, mobile phone base stations and cancer: A review", *Int. J. Radiat. Biol.*, 81(3), pp. 189-203, 2005.
- [74] Myung SK, Ju W, McDonnell DD, Lee YJ, Kazinets G, Cheng CT and Moskowitz JM, "Mobile phone use and risk of tumors: A meta-analysis", *J. Clin. Oncol.*, 20;27(33), pp. 5565-5572, 2009.
- [75] Nittby H, Brun A, Eberhardt J et al., "Increased blood-brain barrier permeability in mammalian brain 7 days after exposure to the radiation from a GSM-900 mobile phone", *Pathophysiology*, 16, pp. 103-112, 2009.
- [76] Ntzouni MP, Stamatakis A, Stylianopoulou F and Margaritis LH, "Short-term memory in mice is affected by mobile phone radiation", *Pathophysiology*, 18(3), pp. 193-199, Jun. 2011.
- [77] Oscar KJ, Hawkins TD, "Microwave alteration of the blood-brain barrier system of rats", *Brain Res.*, 126, pp. 281-293, 1977.
- [78] Phillips JL, Singh NP and Lai H, "Electromagnetic fields and DNA damage", *Pathophysiology*, 16, pp. 79-88, 2009.

- [79] Preece AW, Iwi G, Davies-Smith A, Wesnes K, Butler S, Lim E et al., "Effect of a 915-MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man", *International Journal of Radiation Biology*, 75, pp. 447-456, 1999.
- [80] Ray S, Behari J, "Physiological changes in rats after exposure to low levels of microwaves", *Radiat. Res.*, 123(2), pp. 199-202, 1990.
- [81] Repacholi MH, "Low level exposure to radiofrequency electromagnetic field: Health effects and research needs", *Bioelectromagnetics*, 19, 1±19, 1998.
- [82] Repacholi MH, Lerchl A, Röööli M, Sienkiewicz Z, Auvinen A et al., "Systematic review of wireless phone use and brain cancer and other head tumors", *Bioelectromagnetics*, 33(3), pp. 187-206, 2012.
- [83] Rodgers RJ, Dalvi A, "Anxiety, defence and the elevated plus-maze", *Neurosci. Biobehav. Rev.*, 21(6), pp. 801-810, 1997.
- [84] Ruediger HW, "Genotoxic effects of radiofrequency electromagnetic fields", *Pathophysiology*, 16(2), pp. 89-102, 2009.
- [85] Salford LG, Brun AE, Eberhardt JL, Malmgren L and Persson BR, "Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones", *Environ. Health Perspect.*, 111(7), pp. 881-883, 2003.
- [86] Salford LG, Brun A, Stuesson K, Eberhardt JL and Persson BR, "Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz", *Microsc. Res. Tech.*, 27(6), pp. 535-542, 1994.
- [87] Salford LG, Henrietta N, Arne B, Gustav G et al., "The mammalian brain in the electromagnetic fields designed by man with special reference to blood-brain barrier function, neuronal damage and possible physical mechanisms", *Physical Society of Japan*, 173, pp. 283-309, 2008.
- [88] Sannino A, Sarti M, Reddy SB, Prihoda TJ, Vijayalaxmi and Scarfi MR, "Induction of adaptive response in human blood lymphocytes exposed to radiofrequency radiation", *Radiat. Res.*, 171(6), pp. 735-742, 2009.
- [89] Sannino A, Zeni O, Romeo S, Massa R, Gialanella G, Grossi G, Manti L, Vijayalaxmi L, Vijayalaxmi and Scarfi MR, "Adaptive response in human blood lymphocytes exposed to non-ionizing radiofrequency fields: Resistance to ionizing radiation-induced damage", *J. Radiat. Res.*, 55(2), pp. 210-217, 2013.
- [90] Santini R, Santini P, Danze JM et al., "Study of the health of people living in the vicinity of mobile phone base stations: 1. Influences of distance and sex", *Pathol. Biol.*, 50, pp. 369-373, 2002.
- [91] Sarkar S, Ali S and Behari J, "Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis", *Mutat. Res.*, 320, pp. 141-147, 1994.
- [92] Sienkiewicz ZJ, Blackwell RP, Haylock RG, Saunders RD and Cobb BL, "Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice", *Bioelectromagnetics*, 21, pp. 151-158, 2000.
- [93] Stan G, *Physics Demystified*, McGraw-Hill. p. 474. ISBN 0071382011, 2002.
- [94] Stewart A, Rao JN, Middleton JD, Pearmain P and Evans T. "Mobile telecommunications and health: Report of an investigation into an alleged cancer cluster in Sandwell", *West Midlands Perspect Public Health*, 132(6), pp. 299-304, 2012.
- [95] Sutbeyaz ST, Sezer N, Koseoglu F and Kibar S, "Low-frequency pulsed electromagnetic field therapy in fibromyalgia: A randomized, double-blind, sham-controlled clinical study", *Clin. J. Pain.*, 25(8), pp. 722-728, 2009.
- [96] Sutton CH, Nunnally RL and Carroll FB, "Protection of the microwave-irradiated brain with body-core hypothermia", *Cryobiology*, 10, p. 513, 1973.
- [97] Swerdlow AJ, Feychting M, Green AC, LeekaKheifets LK and Savitz DA, "Mobile phones, brain tumors, and the interphone study: where are we now? *Environ. Health Perspect.*, 119(11), pp. 1534-1538, 2011.
- [98] Van Sorge, Nina M, "Defense at the border: The blood-brain barrier versus bacterial foreigners", *Future Microbiol.*, 7(3),

- pp. 383-394, 2012.
- [99] Vijayalaxmi CY and Scarfi MR, "Adaptive response in mammalian cellsexposed to non-ionizing radiofrequency fields: A review and gaps inknowledge", *Mutat. Res.*, 2014, doi: 10.1016/j.mrrev.2014.02.002.
- [100] Volkow ND, Tomasi D, Wang G-J, Vaska P, Fowler JS, Telang F, Alexoff D and Logan J, "Effects of cell phone radiofrequency signal exposure on brain glucose metabolism", *JAMA*, 305(8), pp. 808-813, 2011.
- [101] Wagner P, Röschke J, Mann K, Hiller W and Frank C, "Human sleep under theinfluence of pulsed radiofrequency electromagnetic fields: Apolysomnographicstudy using standardized conditions", *Bioelectromagnetics*, 19(3), pp. 199-202, 1998.
- [102] Wainwright P, "Thermal effects of radiation from cellular telephones", *Phys. Med. Biol.*, 45(8), pp. 2363-2372, 2000.
- [103] Wall PM, Messier C, "The hippocampal formation-orbito-medialprefrontal cortex circuit in the attentional control of active memory", *Behav. Brain Res.*, 127(1/2), pp. 99-117, 2001.
- [104] Wang B, Lai H, "Acute exposure to pulsed 2450-MHz microwavesaffects water-maze performance of rats", *Bioelectromagnetics*, 21(1), pp. 52-56, 2000.
- [105] Wdowiak A, Wdowiak L and Wiktor E, "Evaluation of the effect of using mobile phones on male fertility", *Ann. Agric. Environ. Med.*, 14(1), pp. 169-172, 2007.
- [106] Wei Y, Xiaolin H and Tao S, "Effects of extremely low-frequency-pulsed electromagnetic field on different-derived osteoblast-like cells", *Electromagn. Electromagn Biol. Med.*, 27(3), pp. 298-311, 2008.
- [107] Xu S, Ning W, Xu Z, Zhou S, Chiang H and Luo J, "Chronic exposure to GSM 1800-MHz microwaves reduces excitatory synaptic activity in cultured hippocampalneurons", *Neuroscience Letters*, 398, pp. 253-257, 2006.
- [108] Xu S, Zhou Z, Zhang L, Zhang W, Wang Y, Wang X, Li M, Chen Y, Chen C, He M, Zhang G and Zhong M, "Exposure to 1800 MHZ radiofrequency radiation induces oxidative damage to mitochondrial DNA in primary cultured neurons", *Brain Research*, 1311, pp. 189-196, 2010.
- [109] Yamaguchi H, Tsurita G, Ueno S, Watanabe S, Wake K, Taki M et al., "1439 MHz pulsed TDMA fields affect performance of rats in a T-maze task only when bodytemperature is elevated", *Bioelectromagnetics*, 24, pp. 223-230, 2003.
- [110] Zhao T, Zou S and Knapp P, "Exposure to cell phone radiation up-regulates apoptosis genes in primary cultures of neurons and astrocytes", *Neurosci. Lett.*, 412(1), pp. 34-38, 2007.

≡ 필자소개 ≡

김 주 환



2002년 2월: 한남대학교 생명과학과 (이학사)  
2004년 2월: 한남대학교 생명과학과 (이학석사)  
2008년 9월: University of Leicester, Cancer Cell and Molecular Biology (이학석사)  
2012년 2월: University of Leicester, Biochemistry (이학박사)  
2013년 10월: 아산생명과학연구원, 박사후 연구원

원

2014년 10월: 국립암센터, 박사후 연구원  
2014년 11월~현재: 단국대학교 의과대학 약리학교실, 박사후 연구원  
[주 관심분야] 전자파 생체영향, 암, 세포주기, DNA Damage

조 성 완



2001년: 중앙대학교 약학과 (약학박사)  
2002년: 미국 유타대학교 포스트닥  
2004년: 미국 MC Tech. 수석연구원  
2005년~현재: 건양대학교 의료공과대학 제약생명공학과 교수  
[주 관심분야] 의약품 제형 개발 및 벨리태이션, 전자파생체영향분야, 천연물 신약 Screening

및 평가, 건강기능성 식품 및 소재,

김 명 주



1998년 2월: 경상대학교 의학과 (의학사)  
2001년 2월: 서울대학교 (의학석사)  
2003년 8월: 서울대학교 (의학박사)  
2004년 3월~2005년 2월: 제주대학교 의과대학 해부학교실 조교수  
2005년 현재: 단국대학교 의과대학 해부학교실 조교수, 부교수, 교수

2014년~현재: 체질인류학회 평의원  
[주 관심분야] 전자파생체영향(뇌신경), 해부학, 노인병, 고병리(미라)

김 학 림



1996년 2월: 중앙대학교 약학과 (약학사)  
1998년 2월: 중앙대학교 (약학석사)  
2006년 5월: 미국 Brown University (이학박사)  
2006년~2010년: 미국 Boston University(Post-Doc, Senior Research Associate)  
2010년~현재: 단국대학교 의과대학 약리학교실 조교수

[주 관심분야] 세포골격, 독성학, 전자파 생체 영향분야