

전자파에 노출된 생쥐에서 운동량에 따른 뇌의 유전자 변화

이민선

신한대학교 간호학과 교수

The Gene Expression Level Differences associated with Exercise in the Mouse Brain exposed to Radiofrequency Radiation

Min Sun Lee

Professor, Dept. of Nursing, Shinhan University

요약 전자파 노출이 자발운동에 따른 뇌의 유전자 발현에 미치는 영향을 10 주간 4그룹 즉, 정상 그룹, 자발운동 그룹, 전자파 노출 그룹, 전자파 노출 및 자발운동 그룹으로 나누어 조사하였다. 선조체(striata)와 시상하부(hypothalamus)에서 RT-PCR을 수행하였으며, 타이로신수산화효소(TH), FoxO3a, AMPK α , mRNA 발현을 조사하였다. 선조체에서 TH mRNA 발현은 자발운동과 전자파 노출 조건에서 각각 감소하였고, 전자파 노출 및 자발운동 그룹에서 더 많이 감소되었다. 이 결과는 전자파 노출 및 자발운동 그룹에서의 운동량 감소가 선조체에서 도파민이 감소할 수 있음을 시사한다. 선조체에서 FoxO3a mRNA 발현은 자발운동 그룹에서 증가했지만, 전자파 노출 및 자발운동 그룹은 현저히 감소했다. 시상하부에서는 TH mRNA 유전자 발현은 전자파 노출을 받은 자발운동 그룹에서 감소가 유의했으며, FoxO3a mRNA는 발현의 현저한 증가가 있었다. 전자파가 기억력에 미치는 영향도 밝히기 위해 해마에서의 여러 단백질들의 발현을 추후 조사할 것이다.

주제어 : 전자파, 자발운동, mRNA, 타이로신수산화효소 FoxO3a, AMPK

Abstract The effect of radiofrequency radiation (RF) exposure on mouse associated with the exercise was investigated in the brain at the molecular level. The expression of tyrosine hydroxylase(TH), FoxO3a, AMPK α and mRNA was investigated by real-time RT-PCR in striatum and the hypothalamus. In the striatum, TH mRNA expression was decreased in the exercise and RF exposure group. FoxO3a mRNA expression was significantly increased in the spontaneous exercise group and a significant decrease was observed in the RF exposure and spontaneous exercise group. In the hypothalamus, TH mRNA expression was significantly decreased in the RF exposure and spontaneous exercise group. But, FoxO3a mRNA expression was significantly increased in the RF exposure and spontaneous exercise group. We will further investigate the expression of protein molecules in the hippocampus of the brain to reveal the effects of RF radiation on memory.

Key Words : Radiofrequency, Exercise, mRNA, Tyrosine Hydroxylase(TH), FoxO3a, AMPK

*This work was supported by the Shihan University Research Fund, 2019

*Corresponding Author : Min Sun Lee(kinesio@shinhan.ac.kr)

Received November 22, 2019

Revised December 27, 2019

Accepted January 20, 2020

Published January 28, 2020

1. 서론

대한민국에서 세계 최초로 4G보다 20배까지 빠른 5세대 디지털 통신(5G)을 시작하면서 미국 일본 중국 등의 선진국보다 먼저 5G 시대가 개막되었고 이런 빠른 통신 속도는 디지털라이프를 더욱 가속화하고 있다[1]. 5G 기술의 특징인 초고속, 초저지연, 초연결의 장점을 활용한 디지털 헬스케어, 스마트홈, 자율주행, 스마트팩토리, 실감콘텐츠를 구현하는 실용화 비즈니스들이 주요 관심사가 되어 5G가 가져올 경제적 이익과 이에 의해 초래될 산업 질서의 개편에만 관심이 집중되고 있는 것도 사실이다[2]. 더구나 최근에는 사회적으로 웰니스(Wellness)에 대한 관심이 높아지면서 스마트 기기를 활용한 뷰티, 다이어트로 대변되는 신체적 건강의 유지와 회복에 대중의 관심이 집중되면서, 웰니스에 대한 연구들은 치유와 안정을 유지시킬 수 있는 새로운 비즈니스의 개발에 대부분의 연구와 투자가 이뤄지고 있다. 하지만, 이런 디지털 자료들을 운영하는 전자 기기들은 다양한 주파수의 전자파를 발생시키는데, 일반인들은 생활 속에서 이를 잘 인지하지 못하고 있다.

일반인들은 실제 자기도 모르는 사이에 이런 웰니스를 저해할 수 있는 여러 환경적 위험 요소에 직접 노출되고 있으나, 석탄이나 석유 등의 화석연료 사용에 의해 대부분 발생하는 미세먼지처럼 직접 눈에 보이는 현상에 대해서는 대중의 관심이 집중하여 많은 연구자들이 연구하고[3], 또 이 결과들을 바탕으로 언론 매체들이 건강에 유해하다는 기사들을 재생산하고 있다. 환경이 웰니스에 미치는 영향에 대해 발표한 다양한 연구들은 그 연구 수준은 고려하지 않고 살펴보더라도, 실제 생체에 어떤 영향을 주는지에 관해서는 여러 이유로 아직까지 명확한 과학적 증거를 통한 생체에 미치는 기전 확립은 정립되어 있지 않다.

생활 속에서 전자파에 직업적으로 노출되는 지하철 기관사와 전화교환원 15명, 그리고 일반인인 주부와 학생 15명의 전자파 노출 정도를 비교한 전자파 연구에서 직업적으로 노출되는 사람들의 평균 전자파 측정수치는 $0.33 \mu\text{T}$, 일반인들은 $0.07 \mu\text{T}$ 로 직업군에서 5배 정도 높은 결과가 나타나는 것으로 보고하였다. 그리고, 최소 2년 이상 무선 텔레비전 방송국에서 나오는 전기장에 노출된 여성을 대상으로 면역체계를 조사한 결과, 전기장에 노출된 사람들은 특정 림프구가 통계적으로 유의한 감소를 보이며, 전기장이 면역체계에 영향을 줘서 신체의 생리활성에 영향을 미칠 수 있다는 보고를 하였다[4]. 그리

고, 자발운동 그룹과 운동을 하지 않는 정상 그룹의 비교 연구에서 염증과 관련된 사이토카인인 IL-6, IL-12, TNF- α 의 혈중 농도는 정상보다 증가했고, IFN γ , IL-1 β , GM-CSF와 같은 전염증성 사이토카인(pro-inflammatory cytokine)의 농도는 변화가 없음을 보여 전자파에 대한 노출과 운동과의 연관성에 관해서도 연구가 되었다[5].

전자파의 생체영향을 연구한 논문들은 주로 휴대폰 사용과 연관되어 가장 근접한 신체부분인 뇌와 신경의 암 발생과의 연관성을 많이 보고 했으며[6], 특히 30~300 Hz의 극저주파에 만성적으로 노출되면 유방암의 발생률이 증가한다고 하였다[7]. 면역조직화학의 연구 방법으로 생쥐를 이용한 전자파의 뇌에 미치는 영향에 대한 결과들도 보고되었다[8]. 하지만, 다른 연구에서는 전자파 노출이 뇌종양 발생 등과 관련성이 없는 것으로 보고되었다[9]. 특히 최근에 신경교종(glioma), 그 중에서도 가장 흔한 교모세포종(glioblastoma) 환자의 생존과 전자파의 노출 정도는 관련이 없다[10]는 보고도 있었다. 이처럼 현재까지 전자파가 인체의 각종의 생리활성이나 병태 생리에 어떤 기전으로 작용하는지를 알아보기 위한 연구들이 진행되었지만, 이 연구결과들 만으로는 전자파의 주파수별 노출이 생체에 어떤 영향을 끼치는지에 대해서는 현재까지도 논란의 여지가 있다. 따라서, 급변하는 5G의 디지털 환경에서 보다 안전한 생활을 향유하기 위해서는 전자파의 영향에 관한 생물 기반의 유전자를 포함하는 분자 기반의 첨단 연구가 필요하다. 이에 본 연구는 10주간의 전자파 노출이 감정과 정서 등에 관여하는 뇌의 선조체와 여러 가지 호르몬을 분비하는 뇌하수체에 어떤 영향을 주는지를 분자생물학적 연구를 통해 밝히고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험동물

실험동물의 관리와 실험은 실험동물의 관리와 사용에 관한 미국의 NIH 가이드라인의 규정에 따라 진행되었다. 실험동물은 수컷ICR 생쥐(6 weeks, 약 26~28 g)는 대한 바이오링크(Chungbuk, Korea)를 통해 구입하였다. 식이와 음료는 자유롭게 섭취하도록 하였으며, 온도 $22 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $55 \pm 5\%$, 12시간 주기의 조건에서 사육하였다. 생쥐는 무작위 추출법에 의해 정상 그룹(n=5, Control group; CON), 자발운동 그룹(n=5, Exercise group; EXE), 전자파 노출 그룹(n=5, Radiofrequency

radiation group; RFR), 전자파 노출 및 자발운동 그룹 (n=5, RFR+EXE)으로 분류하였다. 동물실험은 총 10주간 실시되었고, 전자파에 노출되는 실험군은 매일 6시간 동안 연속으로 전자파에 노출시켰으며, 이후 자발운동을 할 수 있게 하였다(Fig. 1A).

2.2 운동 측정

실험동물의 자발운동과 운동량 측정을 위하여 자발운동(Voluntary wheel exercise) 기구를 사용하였다(Fig. 1B). 자발운동군(EXE)과 전자파 노출 및 자발운동군(RFR+EXE)은 한 마리씩 10개 우리에 분리 사육하였고, 각각의 우리에서 10주간 자발운동을 하도록 바퀴(wheel)를 설치하였다.

2.3 고주파 모바일 전자파 노출 장치

모바일 전자파 노출 장치는 Wave Exposer V20을 이용하였다(Fig. 1C 참고). 이 장비는 835 MHz의 주파수만을 송출하며, 최대 SAR(specific absorption rate: 전자파흡수율) 값은 4.0 W/kg이 발휘하도록 설계된 기계를 사용하였다.

2.4 Total RNA isolation

실험에 사용한 모든 생쥐의 뇌에서 선조체(striata)와 시상하부(hypothalamus) 부위를 적출하였다. Total RNA는 적출된 조직을 1 mL의 TRIzol® 용액에 넣고 균질화한 후 chloroform (Sigma Aldrich, USA) 200 µL를 넣었다. 혼합물을 충분히 섞어 10분간 얼음에 뒀다가 4°C, 13,000 rpm에서 20분간 원심분리해 상층액을 취한 후 동량의 2-prophanol(Sigma Aldrich, USA)을 첨가해 섞은 후 상온에 10분간 뒀다. 그 후 4°C, 13,000 rpm에서 20분간 원심분리해 pellet을 얻고 RNase free 증류수(QIAGEN, USA)로 만든 75% 에탄올로 세척하였다. RNA가 반건조 상태가 될 때까지 상온에서 말린 후 RNase free 증류수 일정량을 넣어 녹였다. 추출된 total RNA는 Multiskan™ GO (Thermo, USA)를 사용하여 260 nm과 280 nm의 파장에서 흡광도를 재어 농도를 정하였다.

2.5 cDNA 합성과 실시간 중합효소 반응 (Real-time PCR)

수집한 샘플은 Oligo(dT)와 Nuclease-free 증류수에 있는 RNA 1 µg/µl를 65°C에서 5분간 뒀다. nuclease-free 증류수, 5X RT buffer, dNTP, DTT,

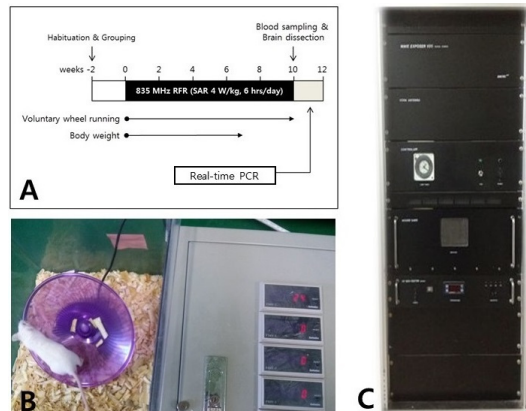


Fig. 1. A. Schematic experimental design for 10 weeks, B. Voluntary wheel exercise and automatic wheel exercise counting device, C. Radiofrequency radiation (RFR) exposure instrument (Wave Exposer V20), which is used for radiation exposure of mouse to 835 MHz at SAR value of 4.0 W/kg.

M-MLV RT(BIONEER, Korea), RNasin® plus RNase Inhibitor(PROMEGA, USA)를 추가해 총 20 µl를 만들었다. 이후 25°C 10분, 42°C 60분, 95°C 10분간 반응시켜 cDNA를 얻었다. PCR 샘플은 1/5로 희석한 cDNA에 2X SYBR Master Mix, 10 pM primers, Nuclease-free water를 넣어 최종 15µl로 반응시켰다 [11]. Real-time PCR은 Rotor-Gene Q(QIAGEN, USA)에서 95°C 5분, 95°C 15초, 58°C 30초를 40 cycles간 반응시킨 후, 72°C에서 15초간 반응시켰다. Primer는 Tyrosine hydroxylase(TH), FoxO3a, AMPKα 그리고 GAPDH의 4개를 사용했다(Table 1 참고). 데이터의 분석은 사용한 기계의 프로그램으로 하였으며 각 primer들의 값을 GAPDH 값으로 나눠 delta-delta CT analysis를 사용하였다.

Table 1. Primer sequences of real-time PCR

Gene Name	Primer sequence	Annealing temperature(°C)
TH	F : 5'-AAGATCAAACCTACCAGCCG-3'	53.1
	R : 5'-TACGGGTCAAACCTCACAGAG-3'	51.6
FoxO3a	F : 5'-CTCACTTTGTCCAGATCTACG-3'	52.8
	R : 5'-CTTCATTCTGAACGCGCATG-3'	56.4

AMPK α	F : 5'-CCTGGAGAAAGATGGCGAC- 3'	54.2
	R : 5'-TCACAGCCACTTTATGTCCG -3'	53.2
GAPDH	F : 5'-TCGTGGATCTGACGTGCCGC CTG-3'	69.8
	R : 5'-CACACCCTGTTGCTGTAGC CGTAT-3'	63.8

2.6 통계분석

통계분석은 GraphPad Prism (GraphPad Software, USA)을 사용하여 양측검정(two-tailed) Student's t 테스트와 분산분석(one-way ANOVA)을 수행하였다. 분산분석에서 각 그룹 사이의 통계적 유의성은 유의 확률이 $p < 0.05$ 인 경우 Tukey's 사후검정(post-hoc test)을 수행하였으며, 결과값은 $\text{mean} \pm \text{SEM}$ 으로 나타냈다.

3. 결과

3.1 선조체에서의 유전자 발현

10주간 모바일 전자파 노출과 유산소 자발운동이 생쥐 뇌의 선조체에서 TH 및 AMPK 신호전달 관련 유전자들의 mRNA 발현에 미치는 영향을 real-time RT-PCR로 조사하였다. 운동량과 관련한 신경전달물질인 도파민 생성의 주요 효소인 TH mRNA의 변화는 정상 그룹과 비교해 전자파 노출과 자발운동 그룹에서 TH mRNA 발현이 현저하게 감소되었다(Fig. 2A 참고). FoxO3a mRNA 발현의 경우 자발 운동 그룹에서는 현저하게 감소한 반면 전자파 노출 그룹에서는 유의하게 증가되었다. 전자파 노출 그룹과 비교하여 전자파 노출 및 자발운동 그룹에서는 FoxO3a mRNA 발현이 정상 회복되었다(Fig. 2B 참고). AMPK α mRNA 발현은 전자파 노출 및 자발운동 그룹에서만 감소되었고, 정상 그룹, 전자파 노출 그룹, 자발 운동 그룹에서는 어떠한 변화도 관찰되지 않았다(Fig. 2C 참고).

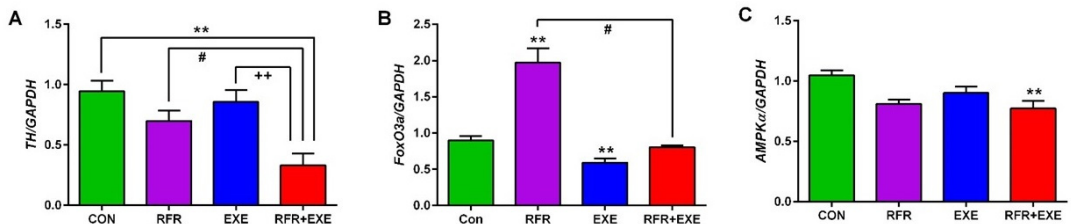


Fig. 2. Effect of RFR exposure and exercise on mRNA expression in striatum. Values are means \pm SEM (n=4). CON: control group; EXE: voluntary wheel exercise group; RFR: radiofrequency radiation group; RFR+EXE: radiofrequency radiation plus voluntary wheel exercise group. (A: $*P < 0.05$, $**P < 0.01$, $***P < 0.001$; compared to RFR+EXE group, B: $**P < 0.01$; compared to CON group, $\#P < 0.05$; compared to RFR+EXE group, C: $**P < 0.01$; compared to CON group).

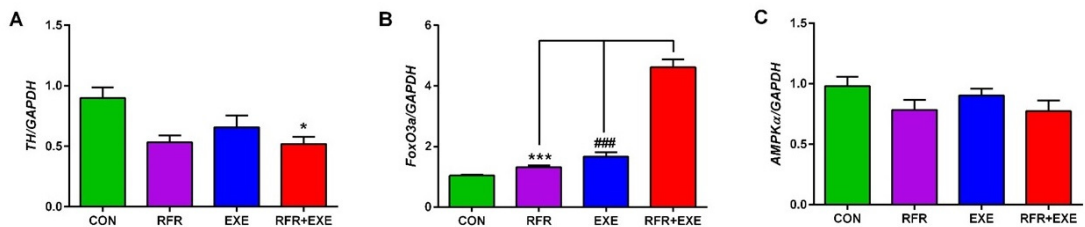


Fig. 3. Effect of RFR exposure and exercise on mRNA expression in hypothalamus. Values are means \pm SEM (n=4). CON: control group; EXE: voluntary wheel exercise group; RFR: radiofrequency radiation group; RFR+EXE: radiofrequency radiation plus voluntary wheel exercise group. (A: $*P < 0.05$; compared to CON group, B: $**P < 0.001$, $###P < 0.05$; compared to RFR+EXE group: $*P < 0.05$, $**P < 0.001$; compared to CON group).

3.2 뇌하수체에서의 유전자 발현

10주간 모바일 전자파 노출과 유산소 자발운동 후 스트레스 증추의 하나인 뇌하수체에서 TH 및 AMPK 신호전달 관련 유전자들의 mRNA 발현에 미치는 영향을 real-time RT-PCR로 조사하였다. 뇌하수체에서는 정상 그룹과 비교하여 전자파 노출 및 자발운동 그룹에서 TH mRNA 발현이 감소되었다(Fig. 3A). FoxO3a mRNA 발현은 자발 운동 그룹에서는 현저하게 감소되었으나, 전자파 노출 그룹에서는 유의하게 증가되었다. 전자파 노출 그룹과 비교하여 전자파 노출 및 자발운동 그룹에서는 FoxO3a mRNA 발현이 정상 회복되었다(Fig. 3B 참고). AMPK α mRNA 발현은 정상 그룹, 전자파 노출 그룹, 자발운동 그룹, 전자파 노출 및 자발운동 그룹에서 어떠한 유의한 변화도 관찰되지 않았다(Fig. 3C 참고).

4. 논의

장기간의 모바일 전자파 노출이 자발운동으로 인한 뇌의 mRNA 발현에 어떤 영향을 미치는 지를 운동과 관련된 선조체와 스트레스 조절 증추인 시상하부에서 운동, 에너지 대사 등에 관련된 TH, FoxO3a, AMPK alpha, 유전자의 mRNA 발현을 통해 조사하였다.

운동과 관련한 도파민의 신경 분포가 있는 선조체에서 도파민 대사 효소인 타이로신수산화효소(TH) mRNA를 조사하였다. 흑색 도파민성 입력신호 전달은 흑질선조체 경로를 거쳐 선조체로 가는 밀접하게 선조체의 기능과 관련된다[12]. 타이로신수산화효소가 카테콜아민 신경전달물질들을 합성하는데 있어 속도결정단계로서 타이로신(L-tyrosine)을 도파(L-DOPA, L- dihydroxyphenylalanine)로 전환시킨다[13]. 타이로신수산화효소의 활성은 중간뇌 흑색질에서의 도파민성 신경세포들의 상실에 따라 감소한다. 운동은 흑질선조체의 도파민 손상에서 회복되는 것을 향상시키고 흑질선조체 시스템에서 도파민성 신경전달물질을 변화시킨다[14]. 주의력결핍 과잉행동장애(ADHD, attention deficit-hyperactivity disorder) 모델 쥐 실험에서 운동부하검사(treadmill exercise)는 주의력결핍 과잉행동장애의 증상을 악화시켰다[15, 16]. 이는 본 연구의 결과인 선조체에서의 자발운동과 전자파 노출 조건에서 각각 TH mRNA 발현이 감소하였으며, 또한 자발운동 및 전자파 노출 그룹에서는 더 많은 감소가 관찰된 결과와 유사하다(Fig. 2A). 전자파 노출에 따른 자발운동량 감소는 체

중의 증가와 도파민 대사 효소의 발현 및 대사의 이상으로 인한 도파민의 생성 감소가 그 원인일 수 있다. 이러한 결과는 자발운동 및 전자파 노출 그룹에서의 운동량 감소가 도파민 대사 효소의 감소에 따른 선조체에서의 도파민 감소가 그 원인임을 보여주는 것이다.

FoxO 인자들은 DAF-16 단백질과 유사한 스트레스 저항과 수명연장의 조절 등의 몇 가지 기능들을 갖는다[17]. 또한 FoxO3는 산화적 손상에 반응해 복합체를 형성하는 것이 밝혀졌다[18]. 본 연구의 결과에서 볼 수 있듯이 전자파로 인한 FoxO3a mRNA 발현과 인산화 증가는 FoxO3a가 스트레스를 극복하게 하는 신호전달 경로의 활성화를 위해 그 발현량이 증가한 것으로써 본 연구 결과와의 유사성을 확인할 수 있다(Fig. 2B). 그러나, Brunet[18]의 연구 결과처럼 복합체를 형성해서인지, 전자파만 조사한 실험군에서는 FoxO3a 발현의 양적 차이가 발견된다. 이는 아마도 신호전달 경로에서 전자파 노출에 의해 FoxO3a를 증폭시키는 신호전달물질이 존재할 것으로 여겨지며, 또한 이 물질들과 함께 FoxO3a 유전자의 발현을 억제하는 경로도 있을 수 있기 때문에 추후 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 보인다. 그리고, 면역염색이나 western blotting 등의 추후 연구를 수행하여 생체에서 직접 작용하는 단백질들의 발현에 대한 비교 데이터를 연구한다면 본 연구인 mRNA 실험의 결과에서 보여주는 실제 생체 기능의 데이터뿐 아니라 더 정확한 논거를 제시할 것으로 보인다.

에너지의 소모과정인 운동은 AMPK를 중심으로 생체 내에서의 에너지 인식 및 항상성 조절과 당과 지방 대사의 중요 역할을 수행한다. 이 때 AMPK는 중심적인 에너지 감지기(sensor)로서 대사과정의 중요한 조절자이다[19]. 식이제한, 운동, 허혈과 같은 AMP : ATP의 비율이 높은 상태에서 세포를 촉진시키는 자극들에 의해 활성화된다[20]. 본 연구 결과와 마찬가지로, 자발 운동은 노화 쥐의 해마에서 AMPK를 활성화 시키고[21], 15 주간의 오랜 트레이닝 후에도 AMPK 단백질의 인산화가 증가 시키고 보고되었다[22]. 이런 AMPK 단백질의 인산화는 노화, 에너지 대사 및 세포성장 및 사멸과 관련된 FoxO3a, SIRT1, 및 PGC-1a 신호전달계와 연관되며[23], 운동 등에 따른 산화 스트레스와 밀접한 관련이 있는 인자들이다[24].

전자파 노출의 연구 실험 대상의 경우 동물과 사람 모두에서 대부분 성인으로 한정된 실험이 이루어지고 있는데, 이런 전자파 실험이 좀 더 폭넓은 데이터를 얻기 위해서는 다양한 연령에 따른 구분이 필요하다. 연령에 따른 병태생리의 차이가 상당하므로 보다 과학적이고 합리

적인 접근이 요구되기 때문이다. 전자파 노출에 따른 생체의 반응을 포괄적으로 얻기 위해 단발적인 전자파 조사 가 미치는 영향에 대한 유전체 연구들이 있어 왔으나[25], real time RT PCR 등의 방법으로 차이가 나는 유전자에 대한 재현은 잘 이뤄지지 않았다. 따라서, 아직까지 전자파의 조사가 미치는 생체 작용기전을 예측하기란 쉽지가 않다.

5. 결론 및 제언

본 연구 모델에서 장기간 전자파 노출은 다양한 외부 스트레스에 반응하는 뇌 내 선조체와 시상하부 신호전달 관련 유전자의 mRNA 발현에 영향을 줄 수 있다. 그러므로, 장기간의 전자파 노출은 자발운동으로 생기는 유익한 생리적 반응을 저해할 수 있는 환경적 인자로 작용할 수 있다. 전자파의 조사가 기억력에 미치는 영향에 관한 대중들의 관심 또한 점점 증가하고 있다. 따라서, 추후 휴대폰 전자파에 노출되면 뇌에서 기억력을 담당하는 해마에 어떤 분자들이 영향을 받는지를 보여줄 수 있다면 더욱 흥미로운 정보를 제공할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] C. O. Shin & H.-J. Kim. (2019). S. Korea clinches title as world's first country to roll out 5G phones, *Maeil Business News Korea*. <https://pulseneews.co.kr/view.php?year=2019&no=206087>.
- [2] H. J. Lee, C. U. Chun & K. B. Kim. (2019). The 5G Ecosystem: How will 5G change our business landscape. *Samjong insight Vol. 63*. <https://home.kpmg/kr/ko/home/insights/2019/02/insight63.html>
- [3] D. C. Shin. (2007). Health effects of Ambient Particulate Matter, *J Korean Med Assoc*, 50(2), 175-182. DOI:10.5124/jkma.2007.50.2.175
- [4] Boscolo, P., Di Sciascio, M., D'ostilio, S., Del Signore, A., Reale, M., Conti, P., . . . Di Gioacchino, M. (2001). Effects of electromagnetic fields produced by radiotelevision broadcasting stations on the immune system of women. *Science of the Total Environment*, 273(1-3), 1-10. DOI:10.1016/s0048-9667(01)00815-4
- [5] Lee, M. S., Oh, C. S., Ryu, J. H., Lee, J., & Kim, M. J. (2018). Alterations in spontaneous movement, corticosterone, and cytokines in mice exposed to 835 MHz radiofrequency radiation. *Korean Journal of Physical Anthropology*, 31(1), 19-26. DOI:10.11637/kjpa.2018.31.1.19
- [6] Inskip, P. D., Tarone, R. E., Hatch, E. E., Wilcosky, T. C., Shapiro, W. R., Selker, R. G., . . . Linet, M. S. (2001). Cellular-telephone use and brain tumors. *New England Journal of Medicine*, 344(2), 79-86. DOI:10.1056/NEJM200101113440201
- [7] Nie, J., Beyea, J., Bonner, M. R., Han, D., Vena, J. E., Rogerson, P., . . . Edge, S. B. (2007). Exposure to traffic emissions throughout life and risk of breast cancer: The western new york exposures and breast cancer (WEB) study. *Cancer Causes & Control*, 18(9), 947-955. DOI:10.1007/s10552-007-9036-2 [doi]
- [8] Maskey, D., & Kim, M. J. (2014). Immunohistochemical localization of brain-derived neurotrophic factor and glial cell line-derived neurotrophic factor in the superior olivary complex of mice after radiofrequency exposure. *Neuroscience Letters*, 564, 78-82. DOI:10.1016/j.neulet.2014.02.013
- [9] Zook, B. C., & Simmens, S. J. (2006). The effects of pulsed 860 MHz radiofrequency radiation on the promotion of neurogenic tumors in rats. *Radiation Research*, 165(5), 608-615. DOI:10.1667/RR3551.1
- [10] Olsson, A., Bouaoun, L., Auvinen, A., Feychting, M., Johansen, C., Mathiesen, T., . . . Villegier, A. (2019). Survival of glioma patients in relation to mobile phone use in denmark, finland and sweden. *Journal of Neuro-Oncology*, 141(1), 139-149. DOI:10.1007/s11060-018-03019-5
- [11] H. J. Lee, J. Wu, J. Chung & J. R. Wrathall. (2013). SOX2 expression is upregulated in adult spinal cord after contusion injury in both oligodendrocyte lineage and ependymal cells. *J Neurosci Res*, 91(2), 196-210. DOI:10.1002/jnr.23151
- [12] Nicola, S. M., Surmeier, D. J., & Malenka, R. C. (2000). Dopaminergic modulation of neuronal excitability in the striatum and nucleus accumbens. *Annual Review of Neuroscience*, 23(1), 185-215. DOI:10.1146/annurev.neuro.23.1.185
- [13] Baek, D. J., Lee, C. B., & Baek, S. S. (2014). Effect of treadmill exercise on social interaction and tyrosine hydroxylase expression in the attention-deficit/hyperactivity disorder rats. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 10(5), 252-257. DOI:10.12965/jer.140162
- [14] O'dell, S., Gross, N., Fricks, A., Casiano, B., Nguyen, T., & Marshall, J. (2007). Running wheel exercise enhances recovery from nigrostriatal dopamine injury without inducing neuroprotection. *Neuroscience*, 144(3), 1141-1151. DOI:10.1016/j.neuroscience.2006.10.042
- [15] Ji, E. S., Kim, C. J., Park, J. H., & Bahn, G. H. (2014). Duration-dependence of the effect of treadmill exercise on hyperactivity in attention deficit hyperactivity disorder rats. *Journal of Exercise Rehabilitation*, 10(2), 75-80. DOI:10.12965/jer.140107

- [16] Kim, H., Heo, H., Kim, D., Ko, I., Lee, S., Kim, S., . . . Kim, J. (2011). Treadmill exercise and methylphenidate ameliorate symptoms of attention deficit/hyperactivity disorder through enhancing dopamine synthesis and brain-derived neurotrophic factor expression in spontaneous hypertensive rats. *Neuroscience Letters*, *504*(1), 35-39. DOI:10.1016/j.neulet.2011.08.052
- [17] Daitoku, H., & Fukamizu, A. (2007). FOXO transcription factors in the regulatory networks of longevity. *Journal of Biochemistry*, *141*(6), 769-774. DOI:10.1093/jb/mvm104
- [18] Brunet, A., Sweeney, L. B., Sturgill, J. F., Chua, K. F., Greer, P. L., Lin, Y., . . . Greenberg, M. E. (2004). Stress-dependent regulation of FOXO transcription factors by the SIRT1 deacetylase. *Science (New York, N.Y.)*, *303*(5666), 2011-2015. DOI:10.1126/science.1094637
- [19] Rafalski, V. A., & Brunet, A. (2011). Energy metabolism in adult neural stem cell fate. *Progress in Neurobiology*, *93*(2), 182-203. DOI:10.1016/j.pneurobio.2010.10.007
- [20] Kahn, B. B., Alquier, T., Carling, D., & Hardie, D. G. (2005). AMP-activated protein kinase: Ancient energy gauge provides clues to modern understanding of metabolism. *Cell Metabolism*, *1*(1), 15-25. DOI:10.1016/j.cmet.2004.12.003
- [21] Bayod, S., Guzmán-Brambila, C., Sanchez-Roige, S., Lanza, J. F., Kaliman, P., Ortuño-Sahagun, D., . . . Pallàs, M. (2015). Voluntary exercise promotes beneficial anti-aging mechanisms in SAMP8 female brain. *Journal of Molecular Neuroscience*, *55*(2), 525-532. DOI:10.1007/s12031-014-0376-6
- [22] Marosi, K., Bori, Z., Hart, N., Sárga, L., Koltai, E., Radák, Z., & Nyakas, C. (2012). Long-term exercise treatment reduces oxidative stress in the hippocampus of aging rats. *Neuroscience*, *226*, 21-28. DOI:10.1016/j.neuroscience.2012.09.001 [doi]
- [23] Canto, C., & Auwerx, J. (2012). Targeting sirtuin 1 to improve metabolism: All you need is NAD(+)? *Pharmacological Reviews*, *64*(1), 166-187. DOI:10.1124/pr.110.003905
- [24] Salminen, A., Kaarniranta, K., & Kauppinen, A. (2013). Crosstalk between oxidative stress and SIRT1: Impact on the aging process. *International Journal of Molecular Sciences*, *14*(2), 3834-3859. DOI:10.3390/ijms14023834
- [25] Whitehead, T. D., Moros, E. G., Brownstein, B. H., & Roti Roti, J. L. (2006). The number of genes changing expression after chronic exposure to code division multiple access or frequency DMA radiofrequency radiation does not exceed the false-positive rate. *Proteomics*, *6*(17), 4739-4744. DOI:10.1002/pmic.200600051

이 민 선(Min Sun Lee)

[정회원]



- 1984년 2월 : 연세대학교 체육학과(이학사)
- 2001년 2월 : 연세대학교 체육교육과(체육학석사)
- 2006년 2월 : 가톨릭대학교 해부학과(의학석사)
- 2007년 8월 : 연세대학교 체육학과(체육학박사)
- 2015년 2월 : 단국대학교 해부학과(의학박사)
- 2017년 1월 ~ 현재 : 신한대학교 간호학과 교수
- 관심분야 : 의과학
- E-Mail : kinesio@shinhan.ac.kr